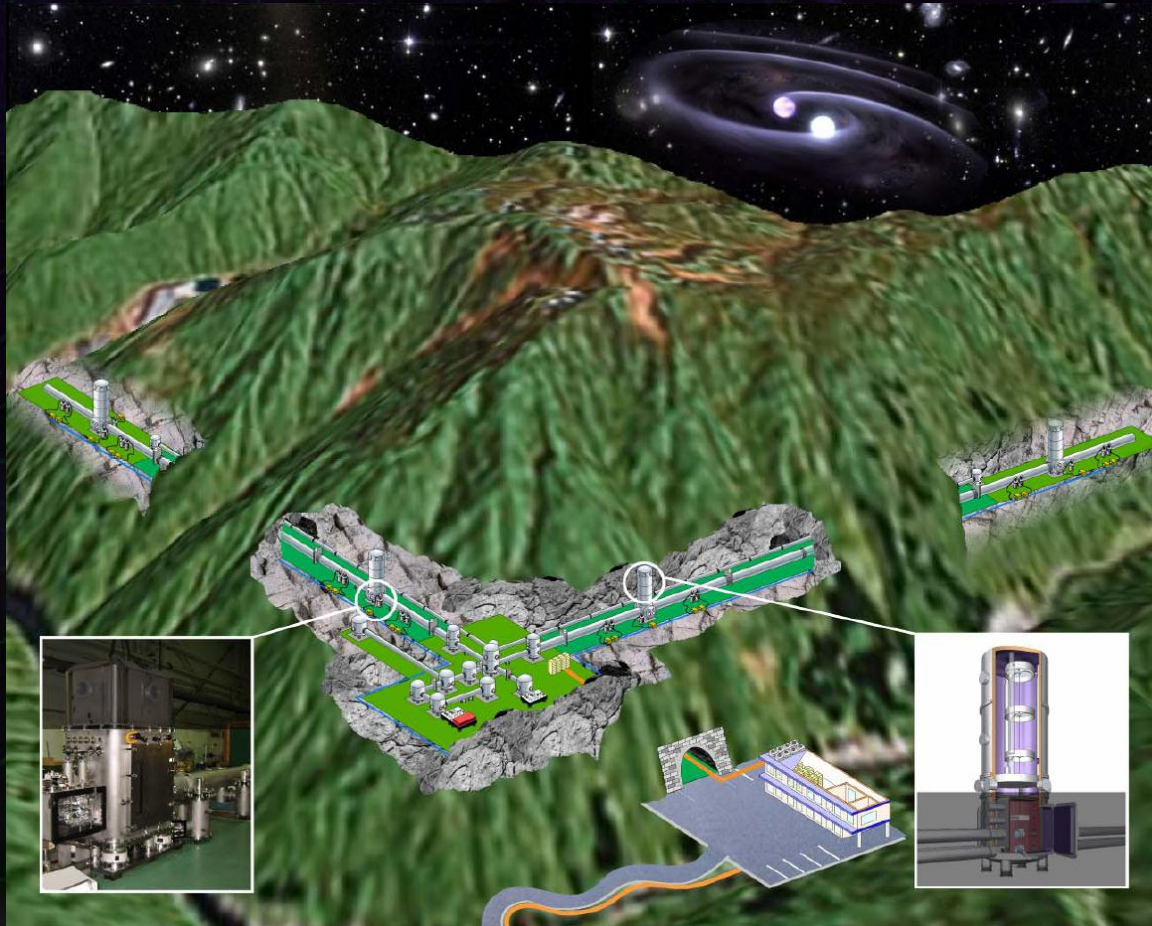


# LCGT計画の概要



**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



# 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

中性子性

ブラックホール

初期宇宙

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

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)

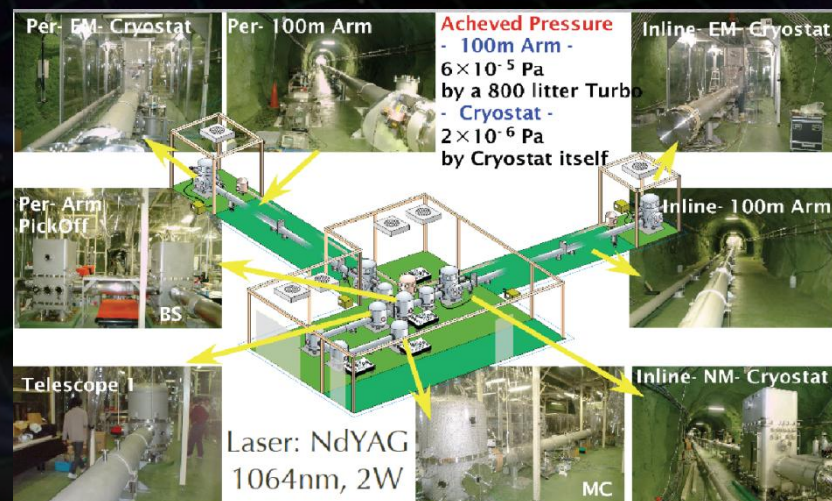


## CLIO (2002~)

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)  $\propto 1/(\text{波源までの距離})$

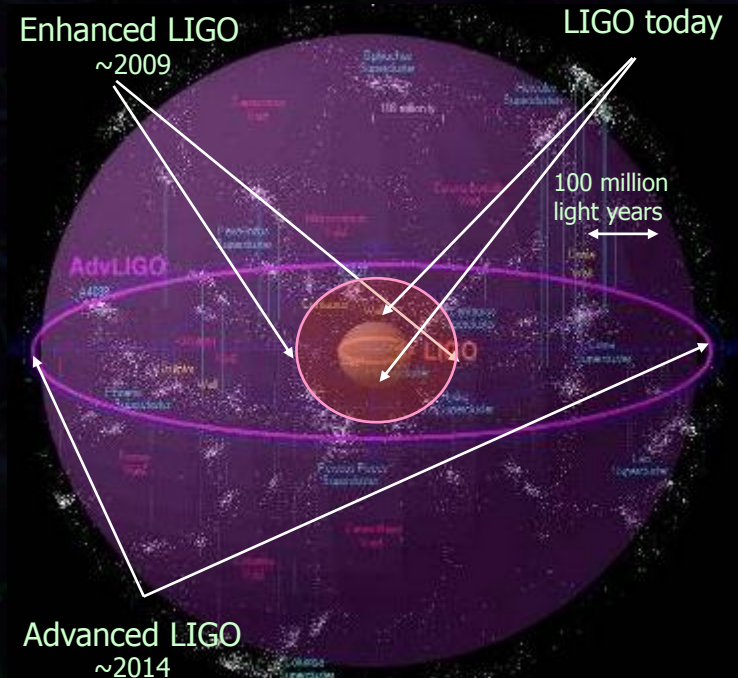


感度が10倍向上 → イベントレートは  $10^3$ 倍

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

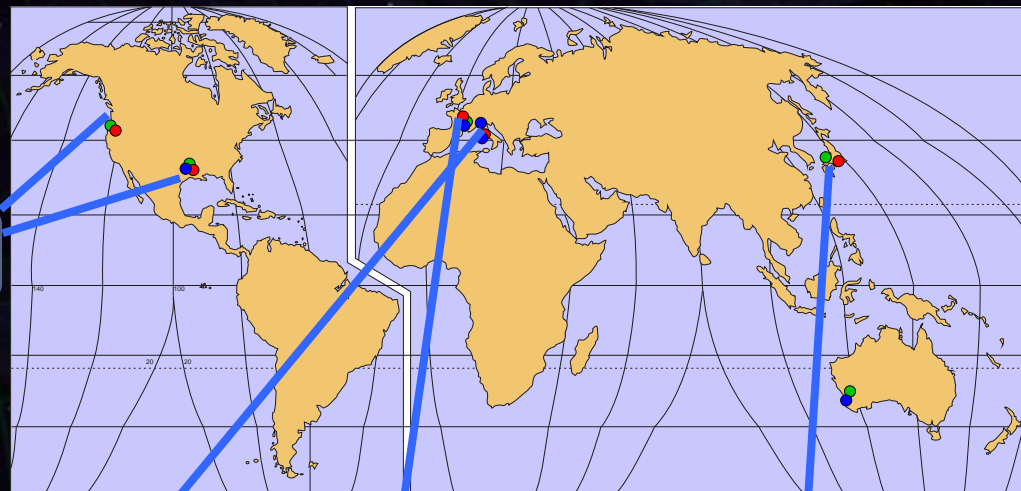
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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)



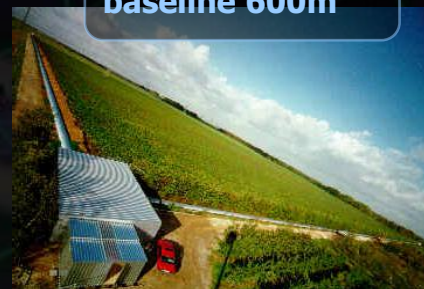
LIGO-Australia  
in proposal



LIGO-India  
in proposal



Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



LCGT (JPN)  
baseline 3km

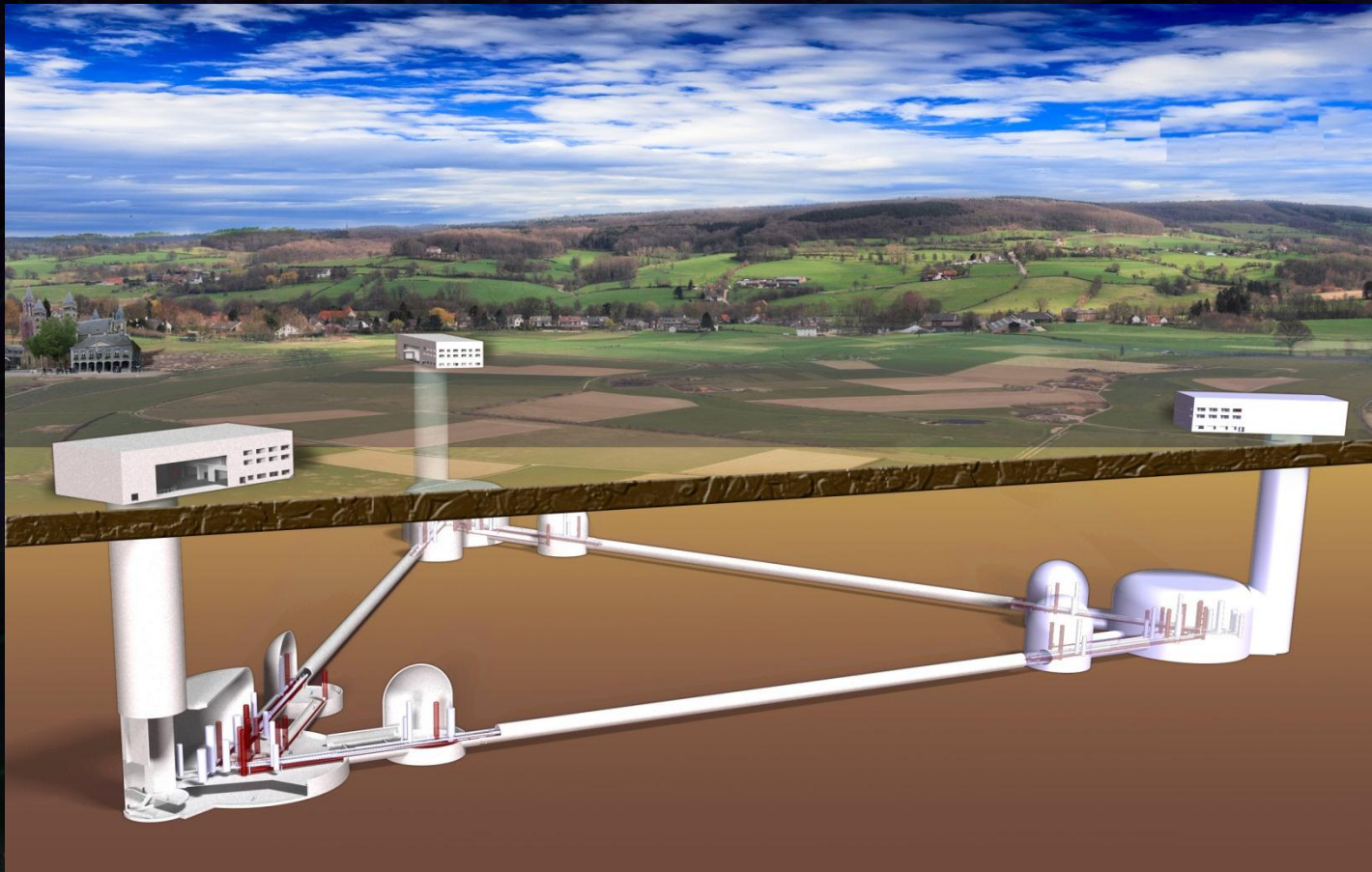




# 第3世代 重力波望遠鏡

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

感度：さらに一桁の改善, 2021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

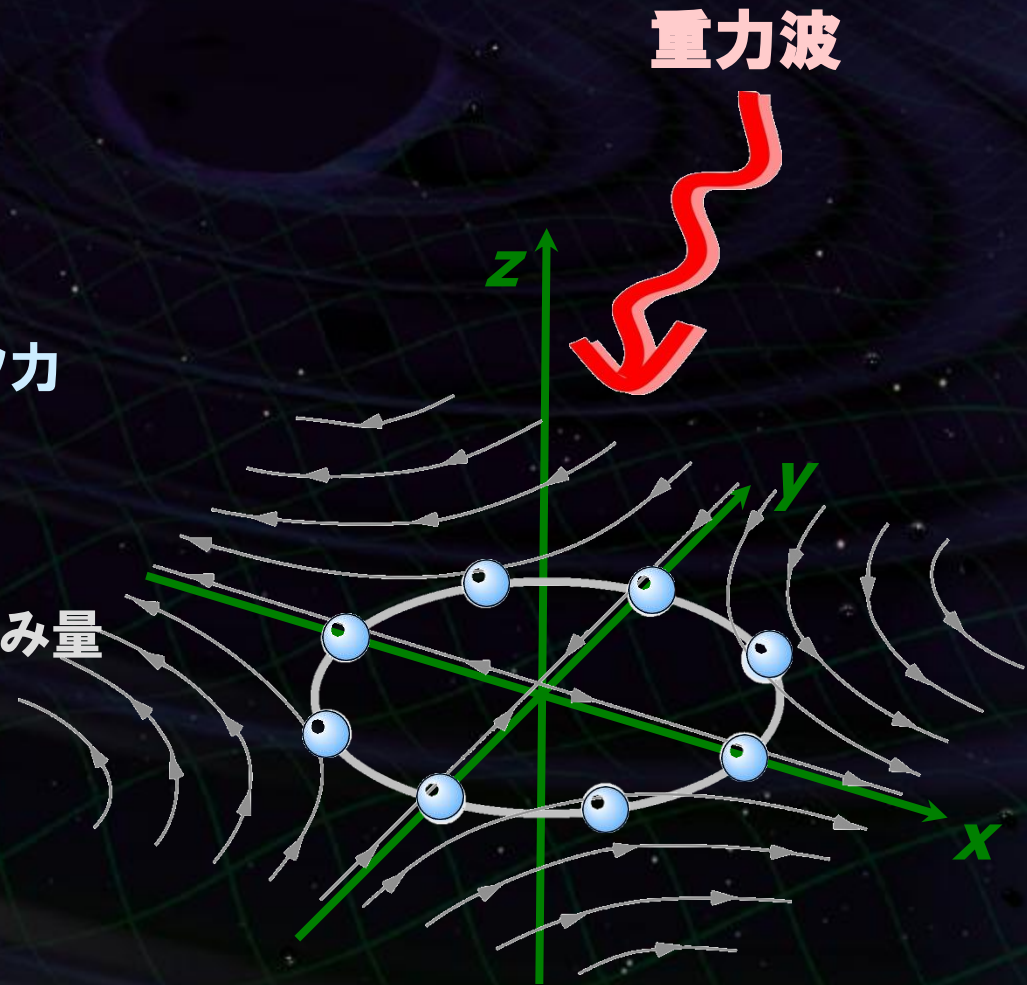
## 重力波の効果

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

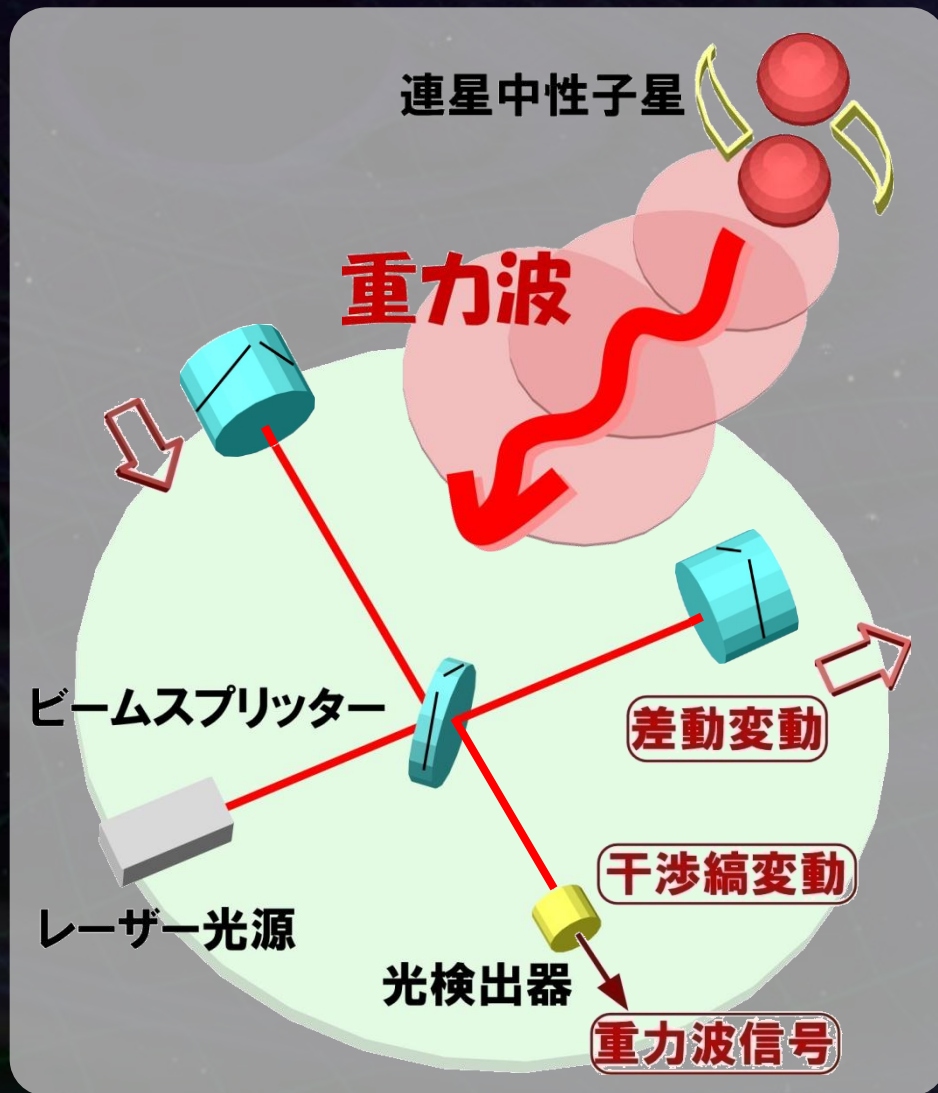


それぞれ、懸架された鏡で打ち返し  
干渉させる → 光検出器で観測.

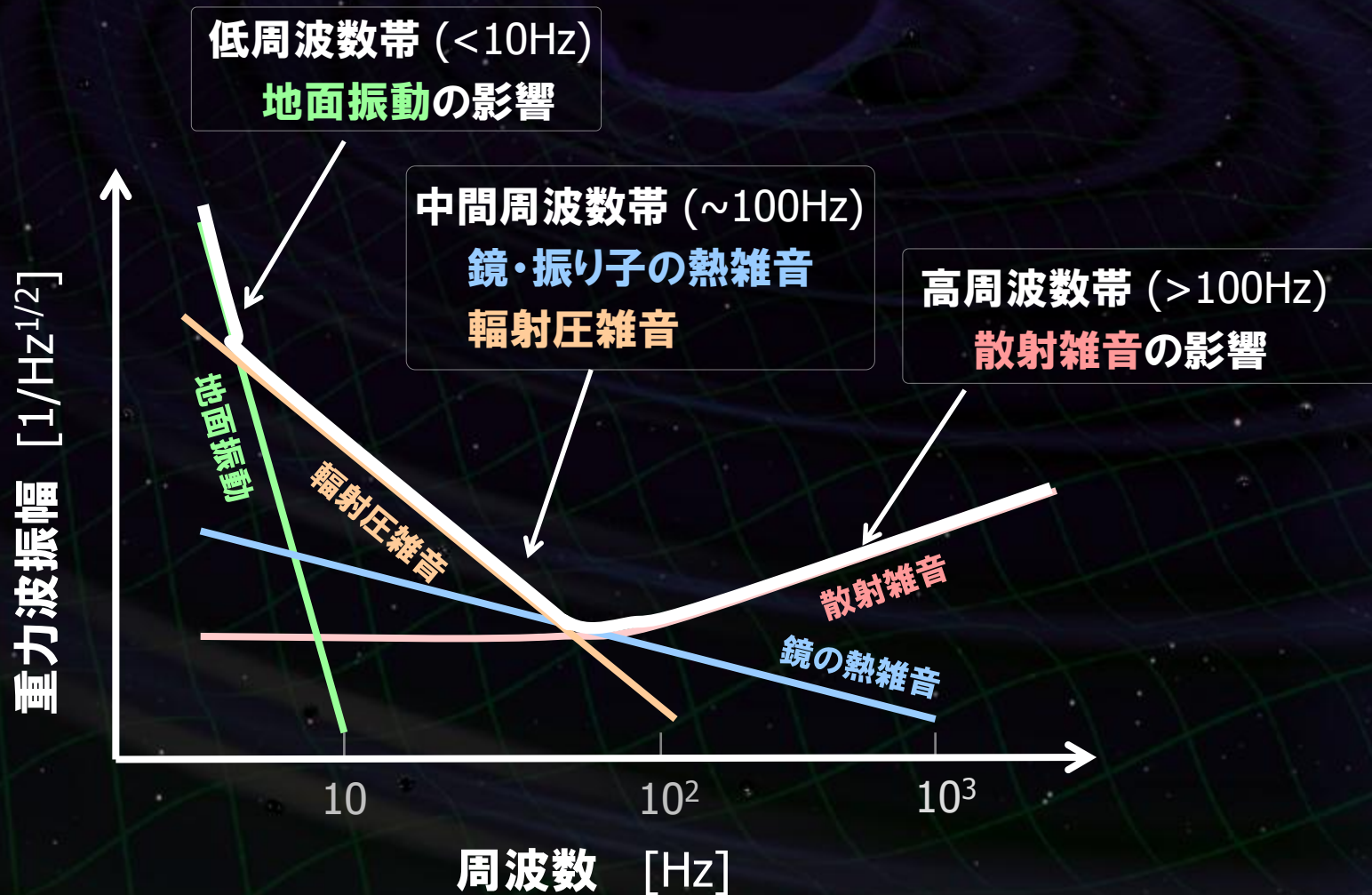
重力波が入射



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

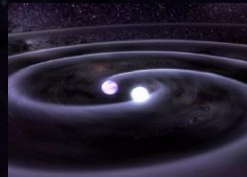




# 重力波望遠鏡の高感度化

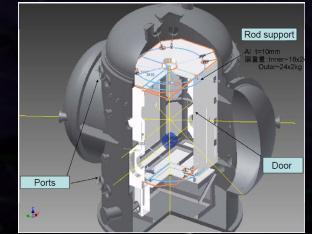
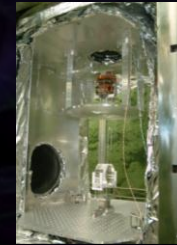
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



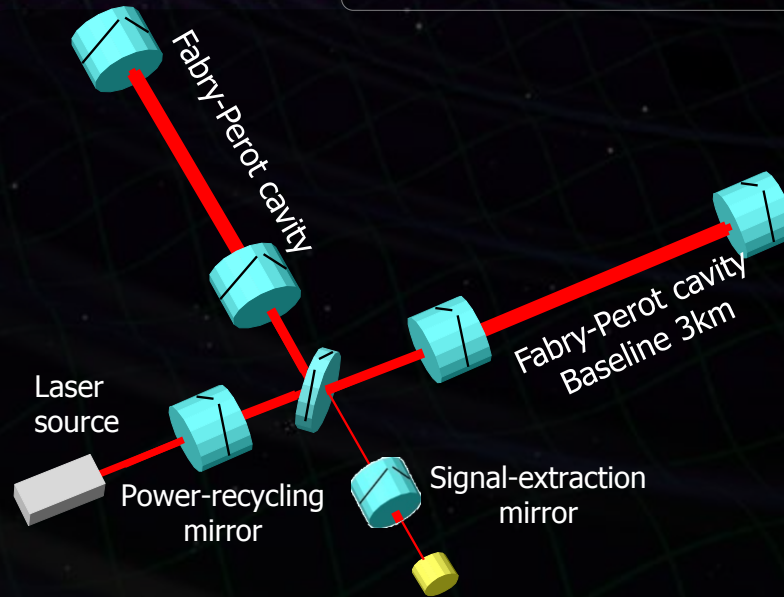
## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



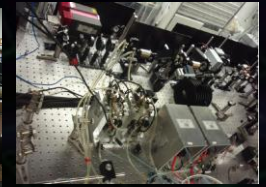
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



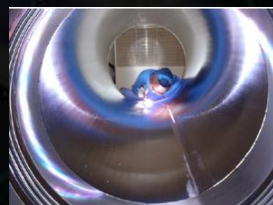
## ・光の量子雑音

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

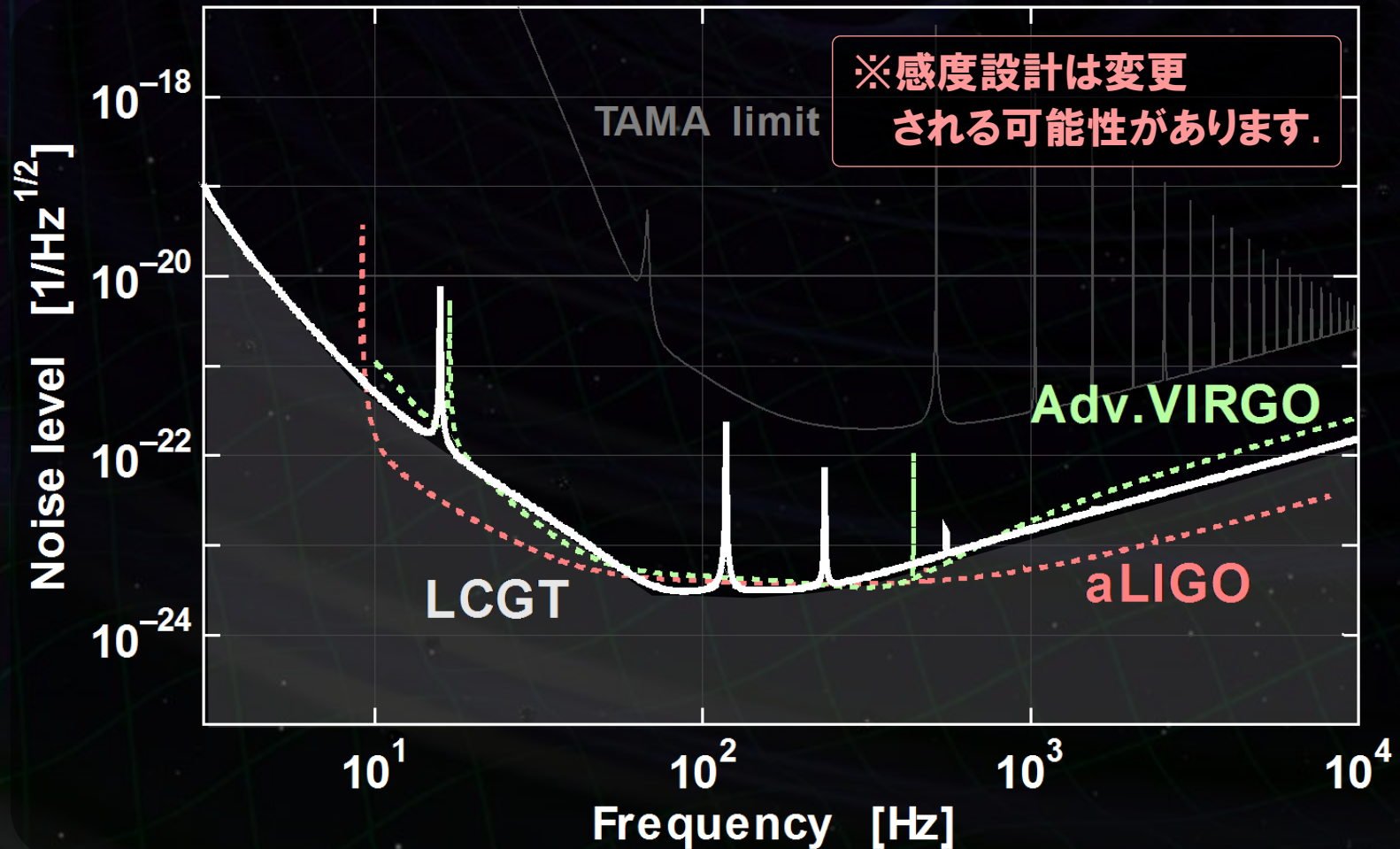


# LCGTの感度限界

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:

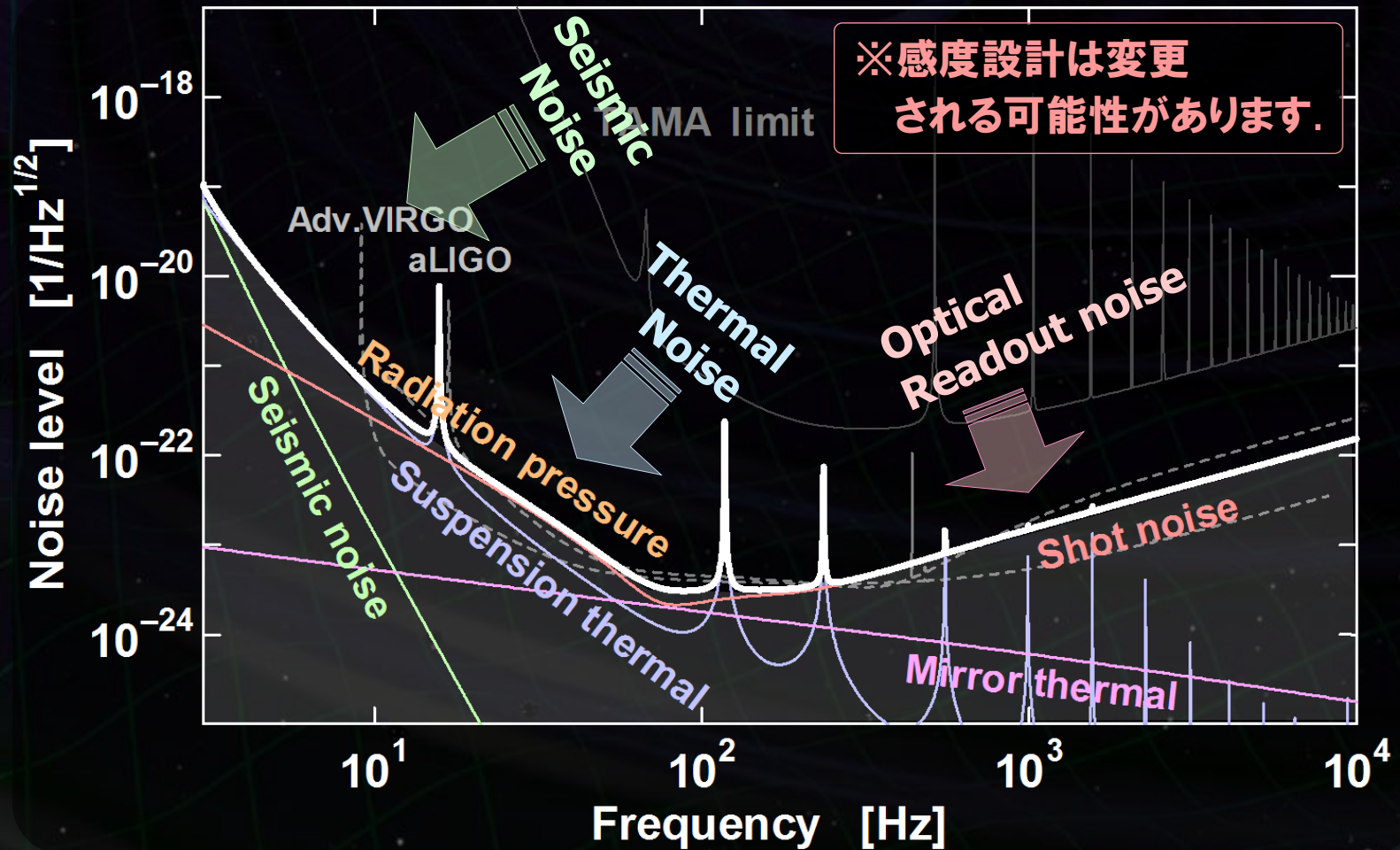
$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

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**)

# 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

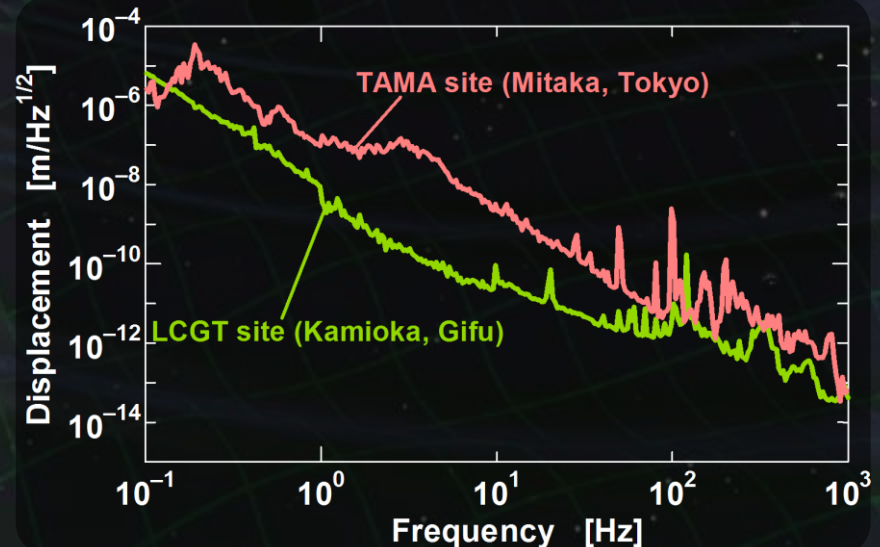
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.  
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

### 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, )

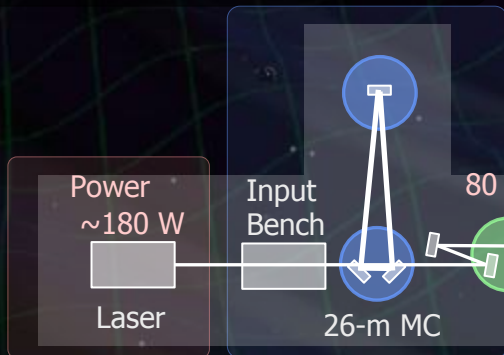


LCGT : **地下サイトに建設** → 2-3桁小さい常微動, 長期安定な環境.  
**高性能防振装置 SAS** : 多段・低周波の防振装置.

# LCGT 干渉計構成

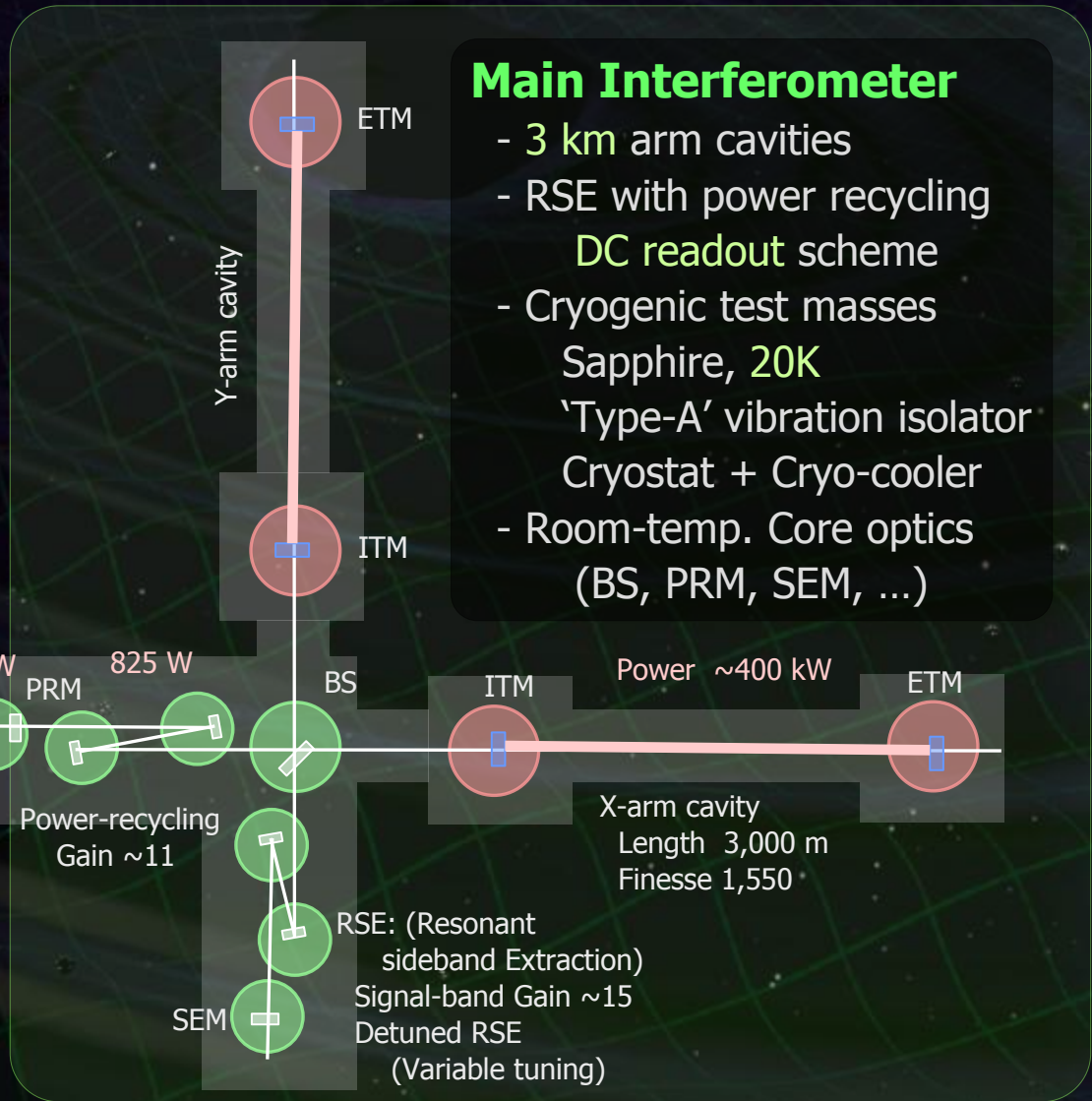
## Input/Output Optics

- 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.



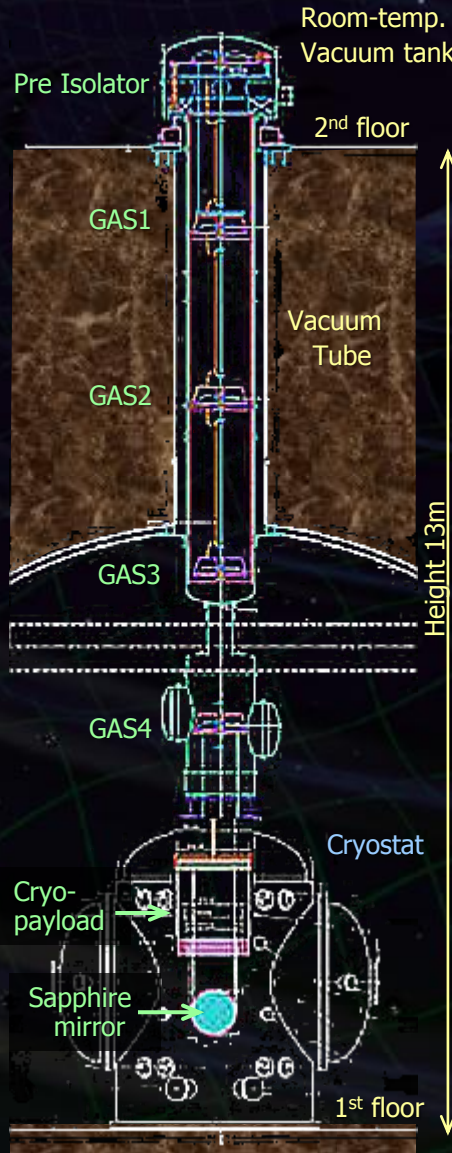
Pre Isolator



GAS filter

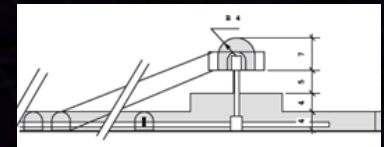
## 低温ペイロード

- 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.



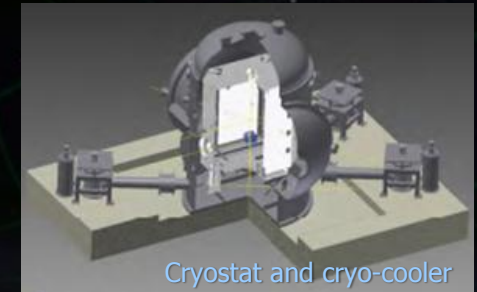
## トンネル : 2層構造

- 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

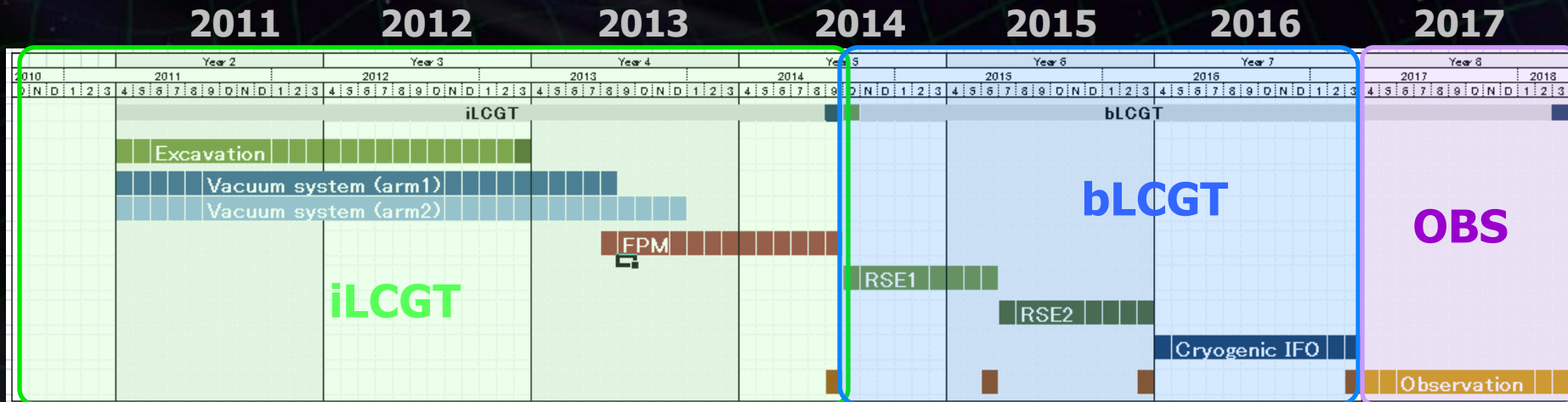
# LCGTスケジュール



# 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

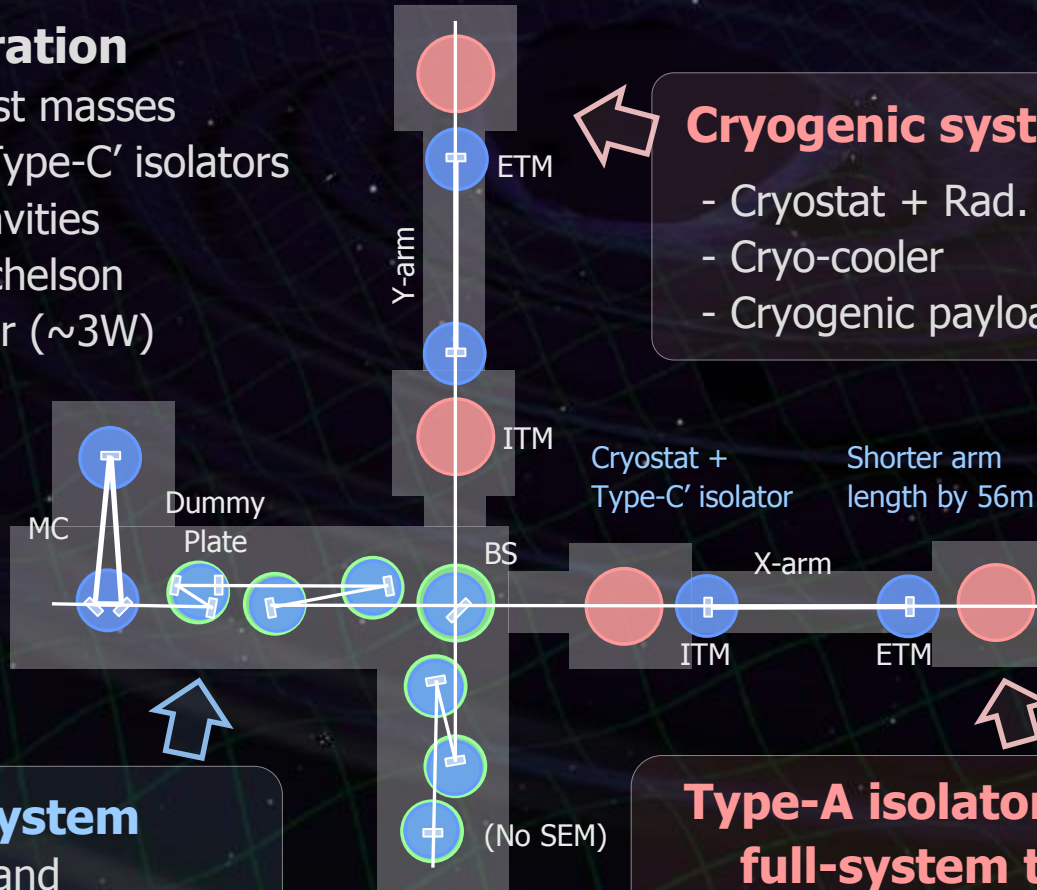
※スケジュールは変更  
される可能性があります。



# 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 ( $\sim 3\text{W}$ )



## Cryogenic system test

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

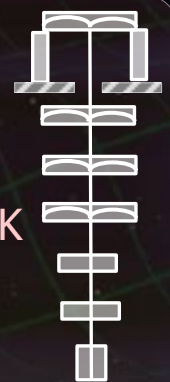
## Type-C' system

- 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

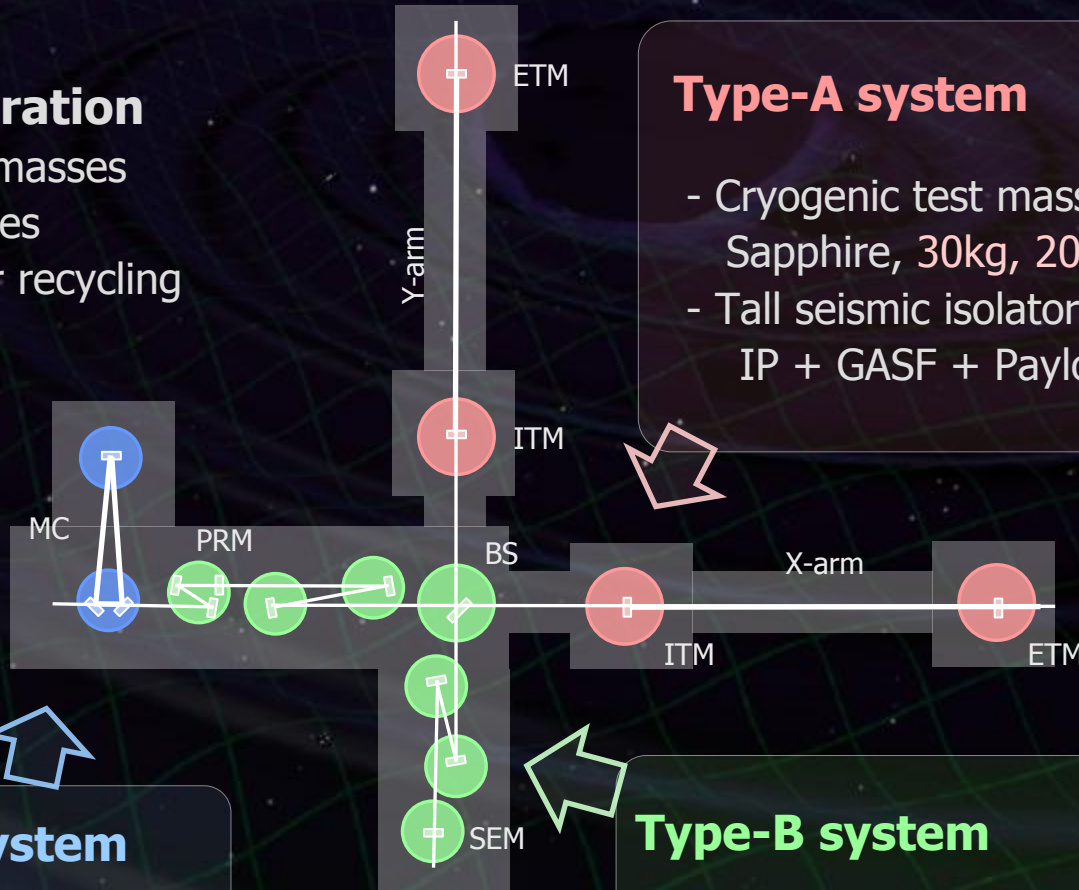




# bLCGT 干渉計構成

## 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

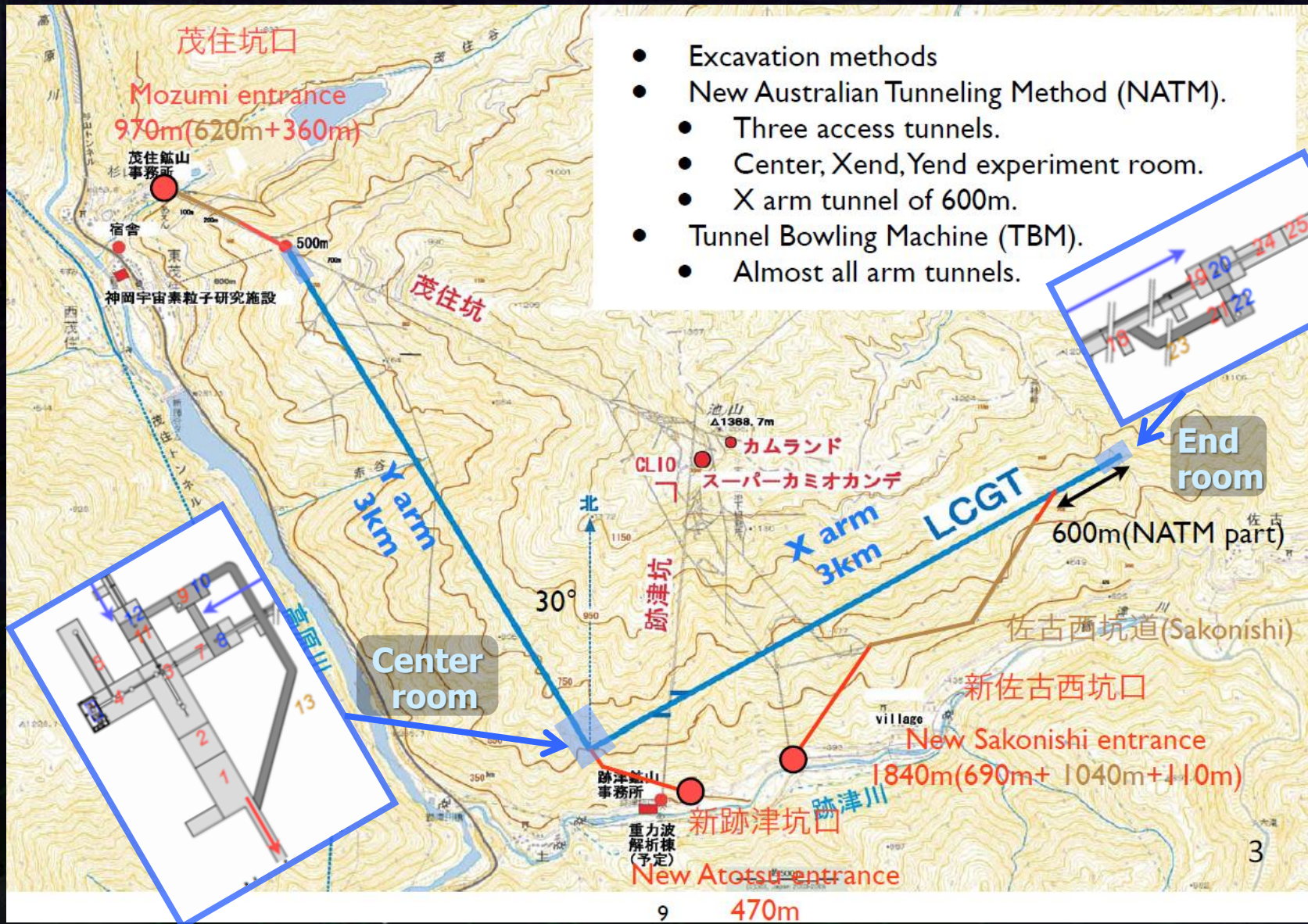
- Core optics (BS, RM, ...)  
Silica, 10kg, 290K
- IP + GASF + Payload
- Stack for aux. optics



# LCGTの設計と現状



# LCGTサイト



- 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.

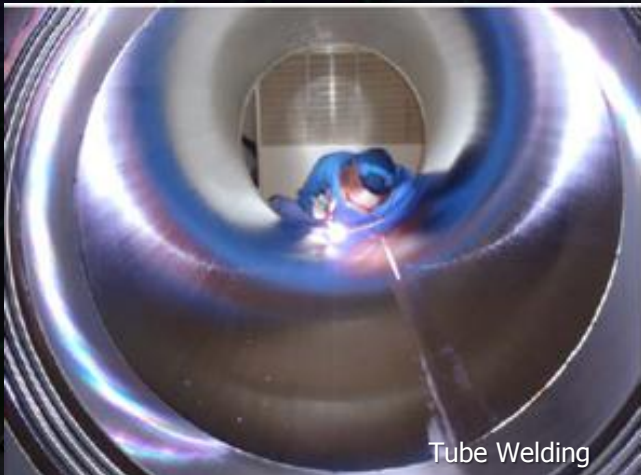
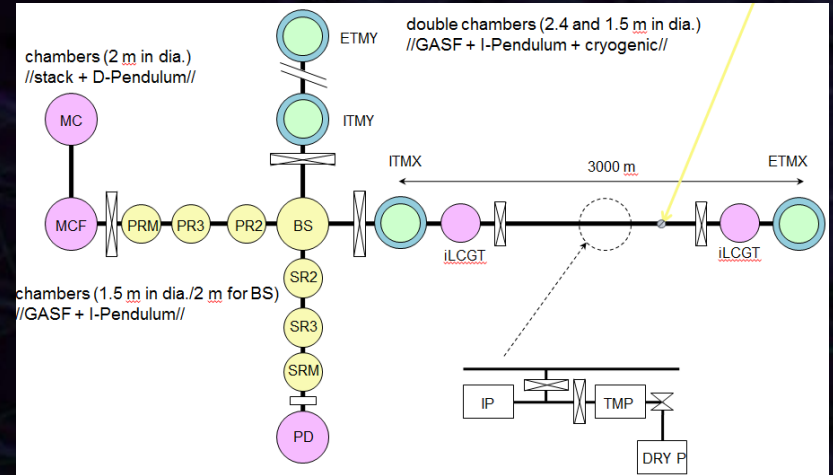


# 真空系

## ・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

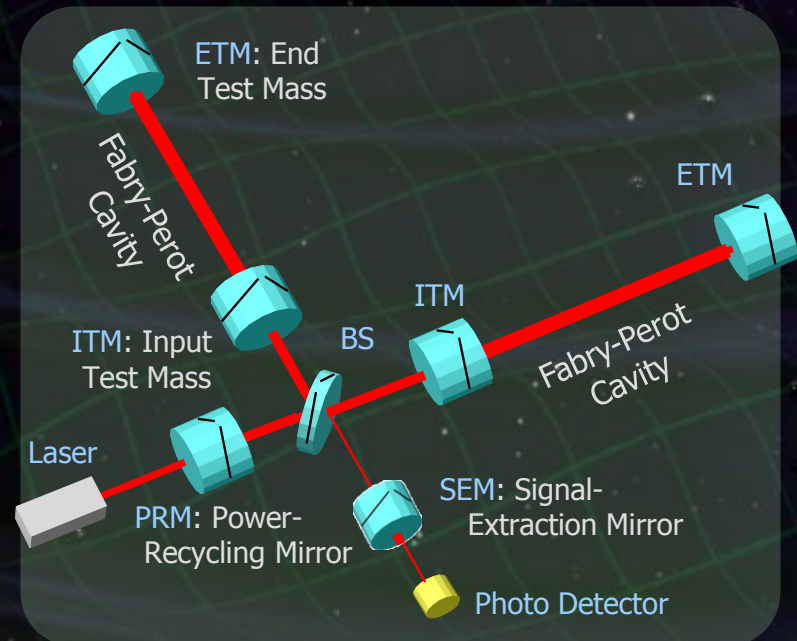
## •RSE干渉計方式 (Resonant-Sideband Extraction)

### 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



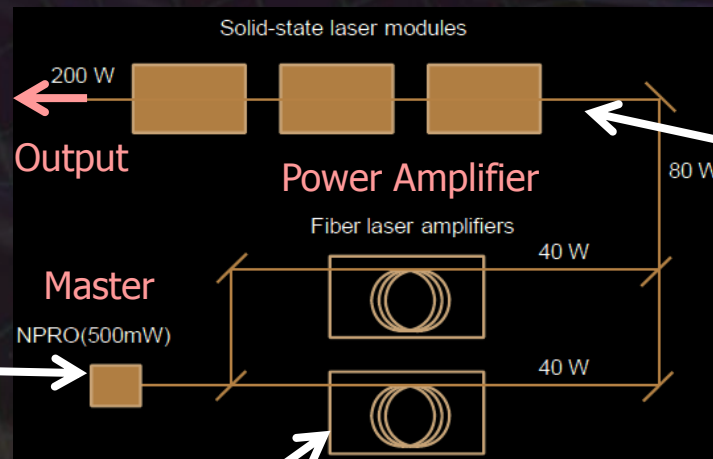
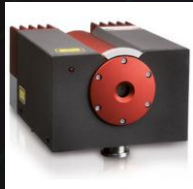


# レーザー光源

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

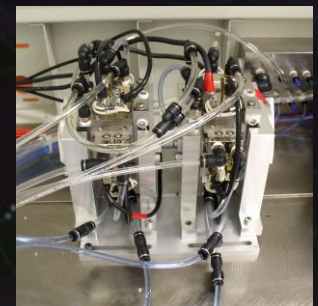
マスターレーザー  
Nd:YAG, 500mW  
NPRO方式固体レーザー



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



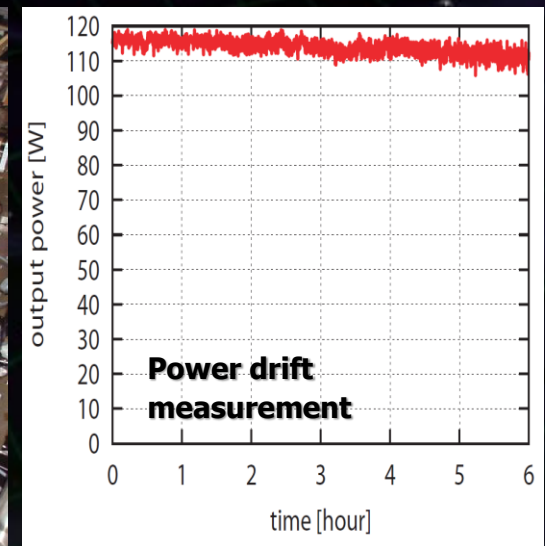
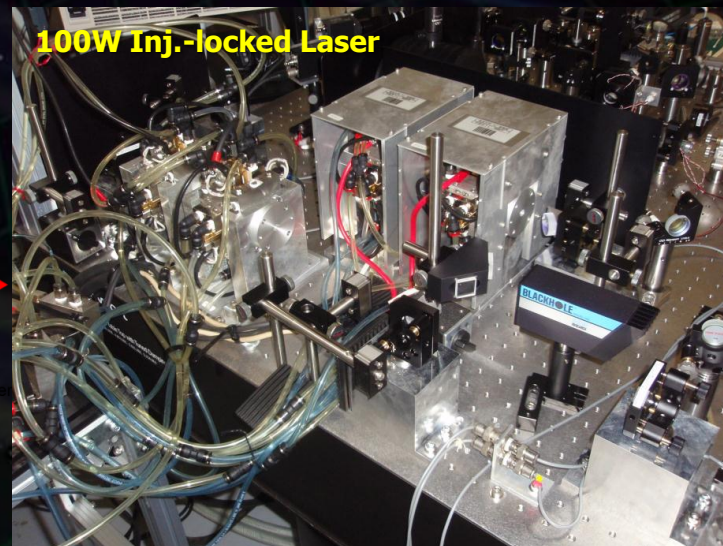
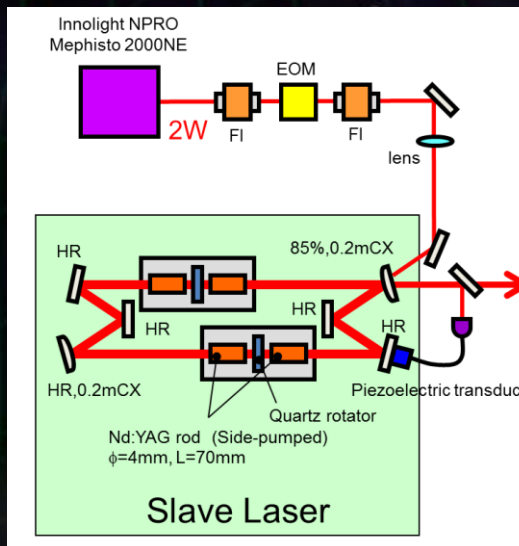
# 高出力光源の開発

## 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.



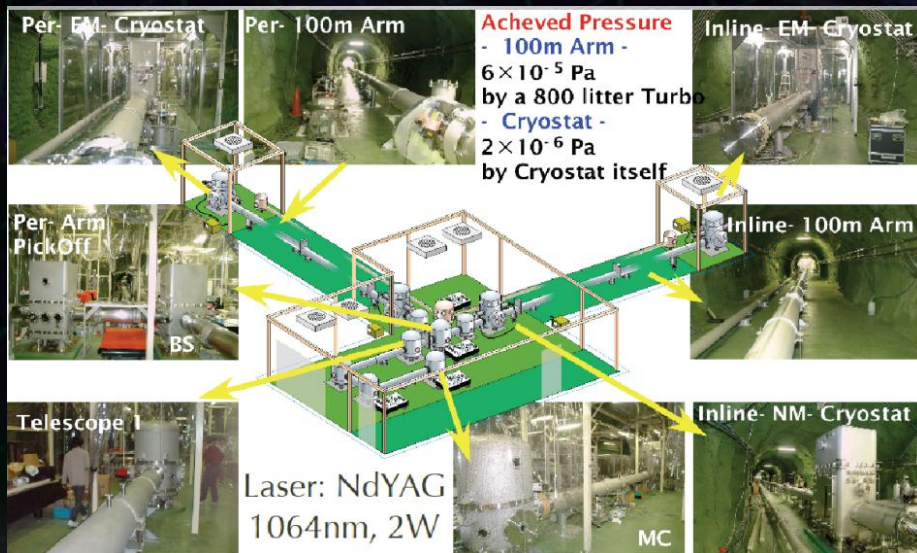


# 低温干渉計の動作実証

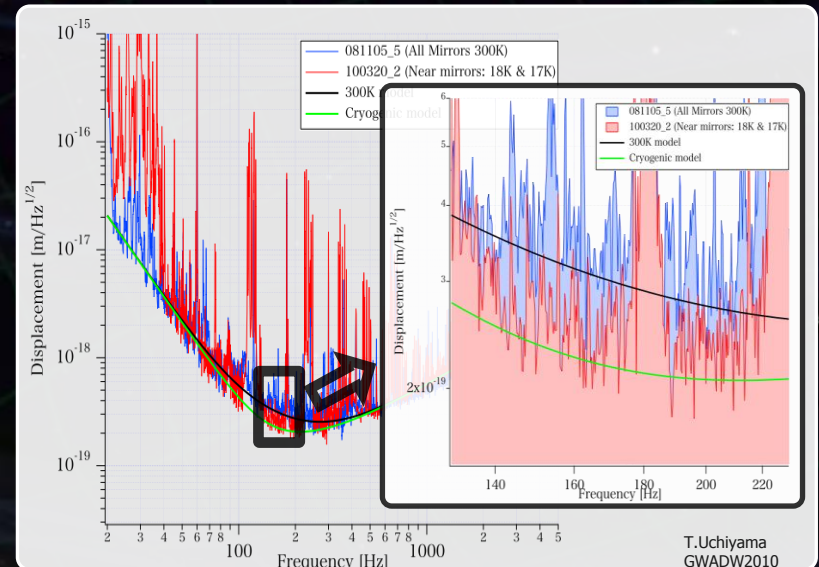
- CLIO --- 基線長100mの低温干渉計
  - 神岡の地下サイトに設置されている
  - 鏡・振り子を 約16K まで冷却した状態で動作。  
 サファイヤ鏡, 低温懸架装置, 低雑音冷凍機などを使用。

⇒ 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。

詳細は内山氏講演にて。



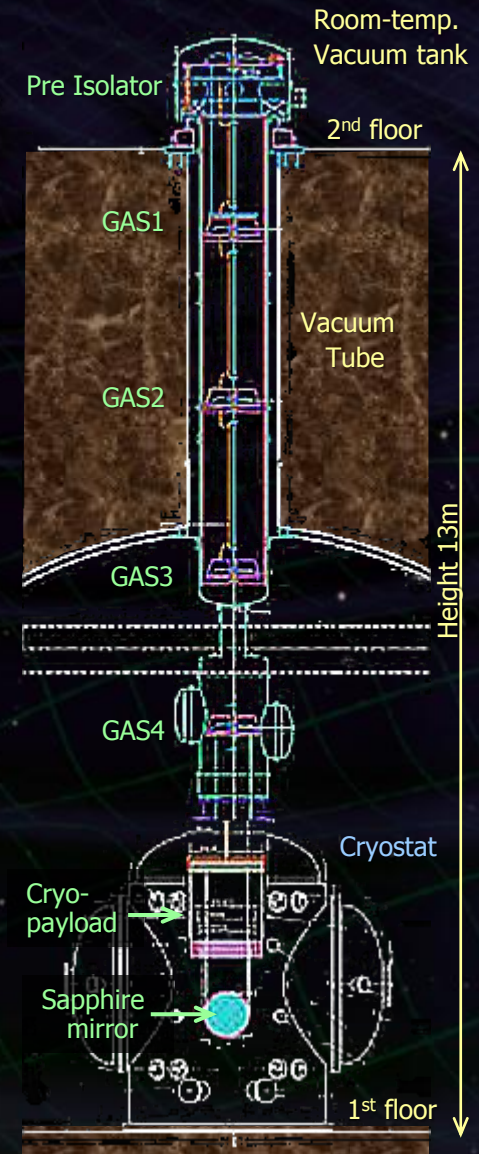
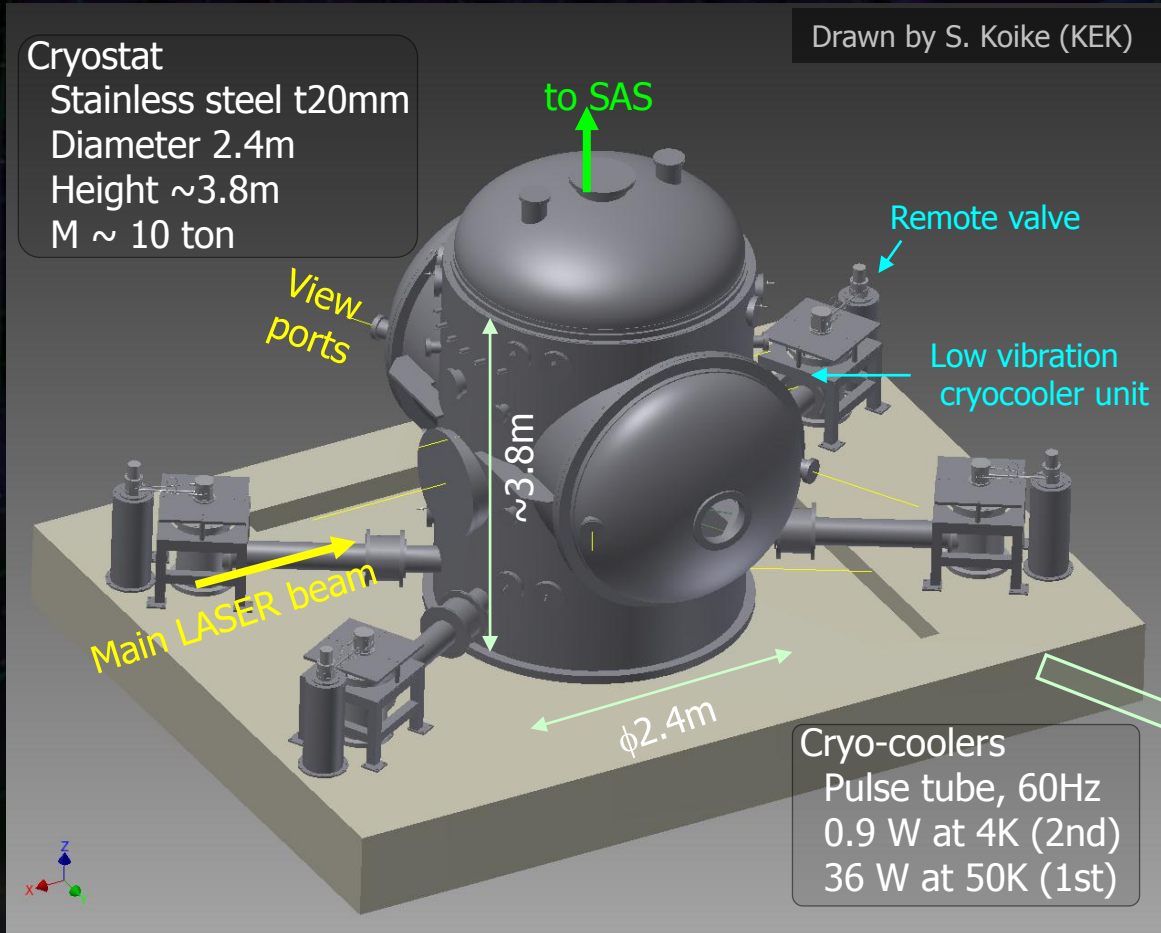
CLIO : 100-m cryogenic interferometer



T.Uchiyama  
 GWADW2010

# クライオスタット

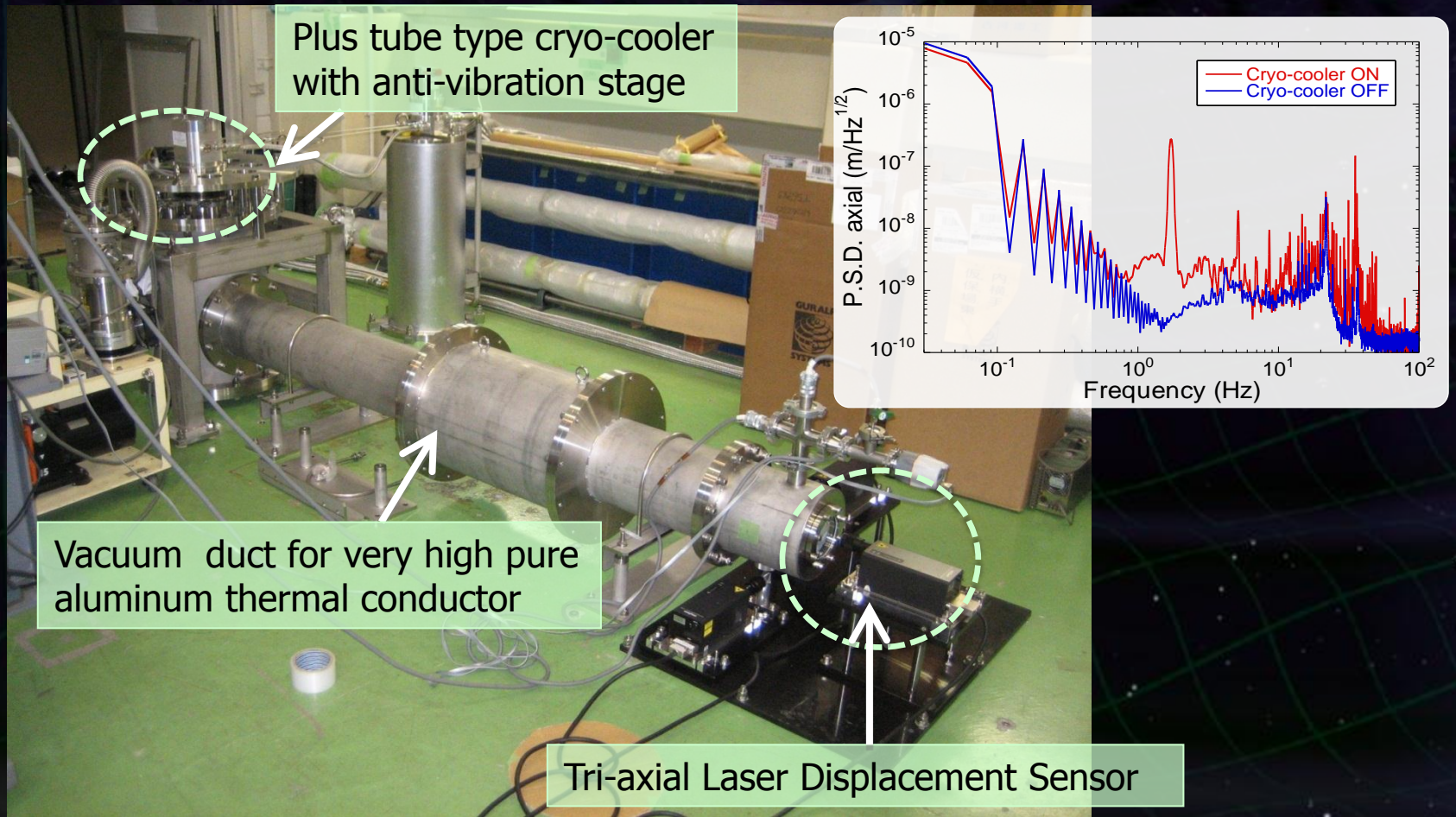
- CLIO等の経験を生かして設計 (構造解析, 熱解析)  
→ 2012年度中頃に1台目評価試験.





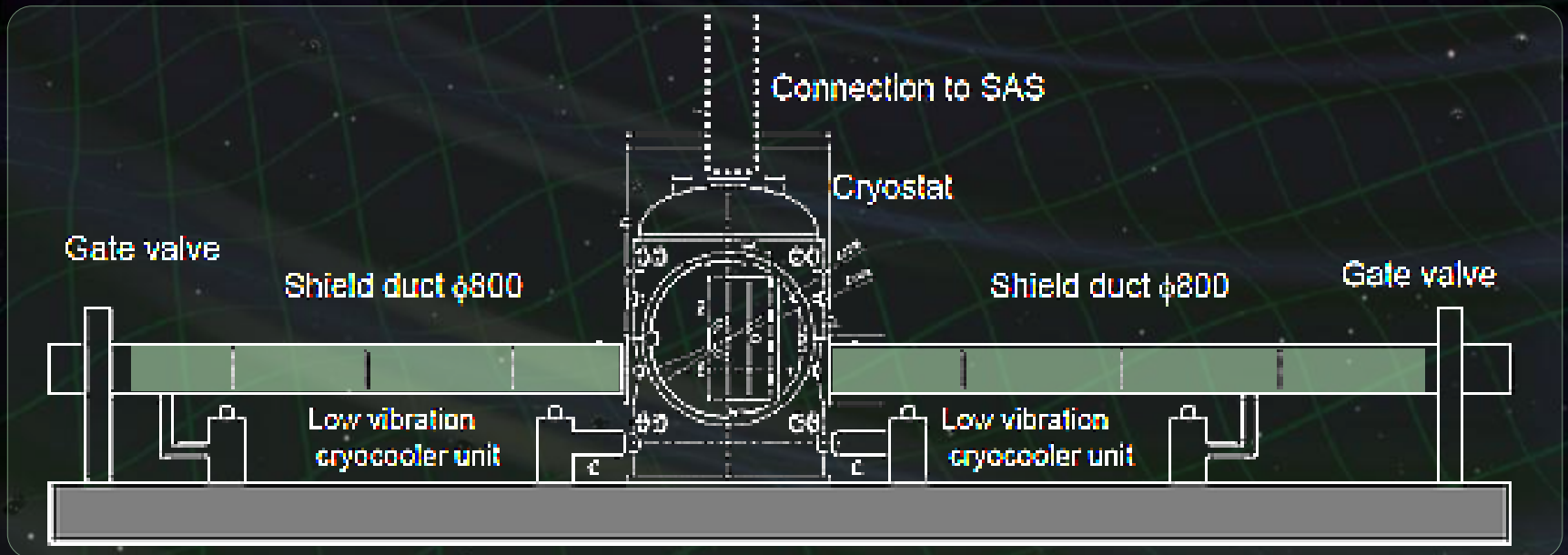
# 低振動冷凍機

- 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.





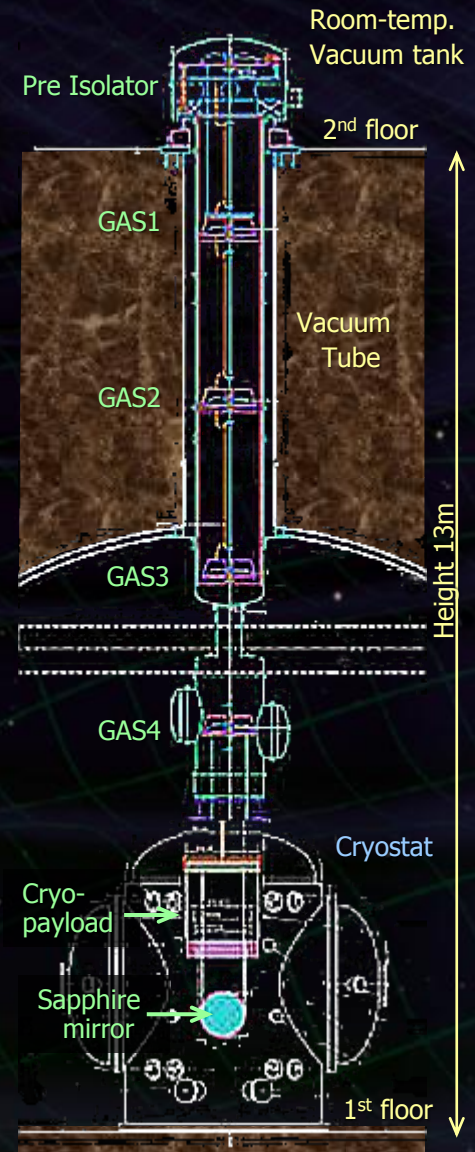
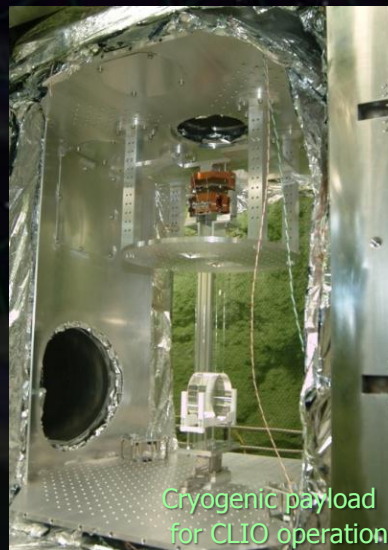
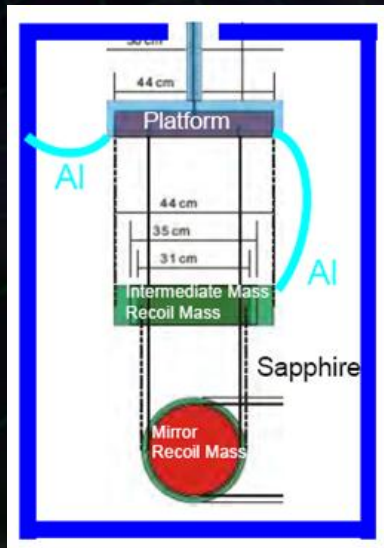
# 低温ペイロード

## •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)

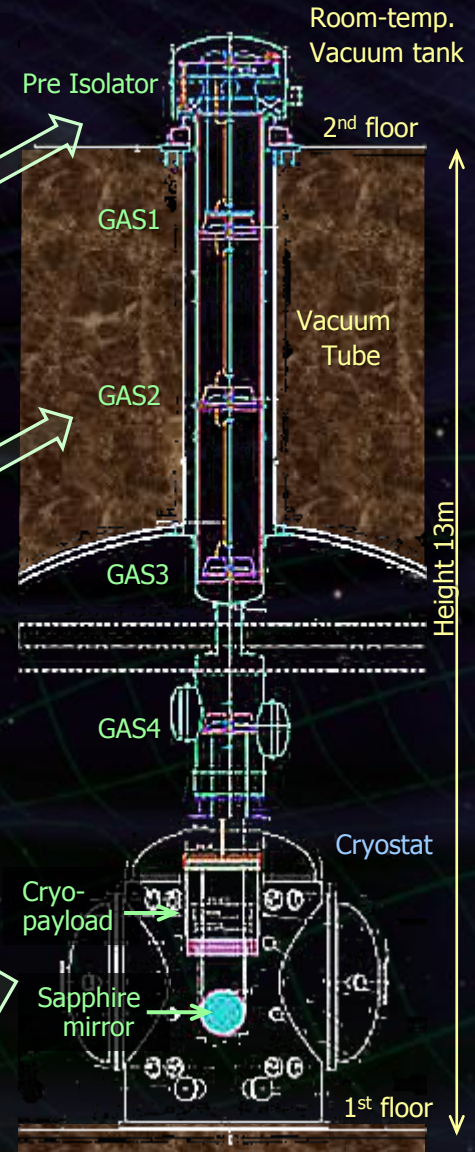
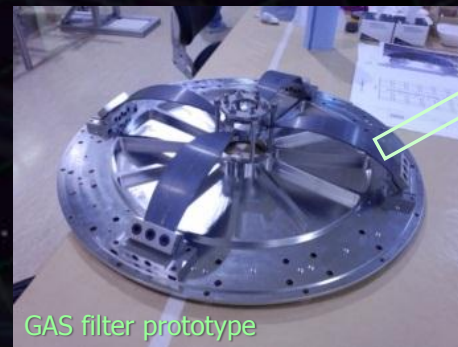
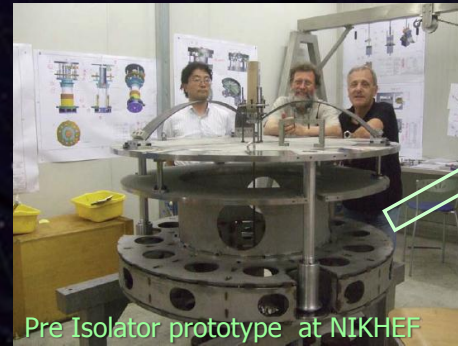




# 試験マス防振系

- 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.

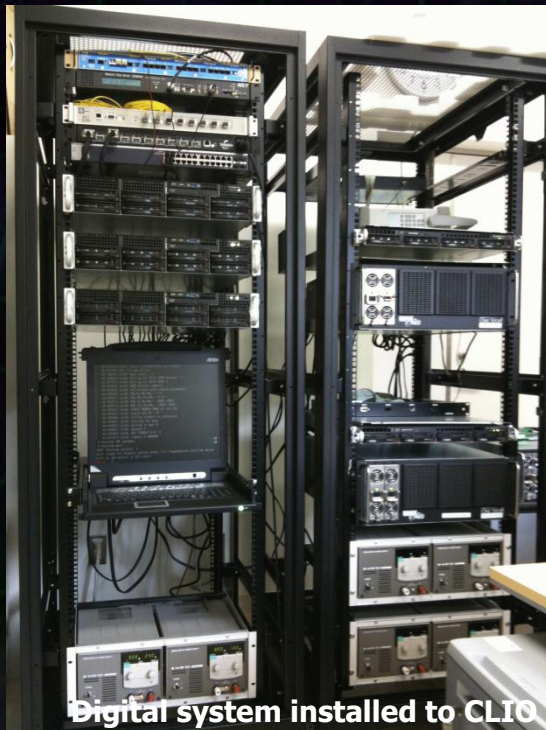
ADC/DAC, アナログフロントエンドを備えたデジタル制御系をネットワーク接続.

Fast loop : 16 kHz, 64channel

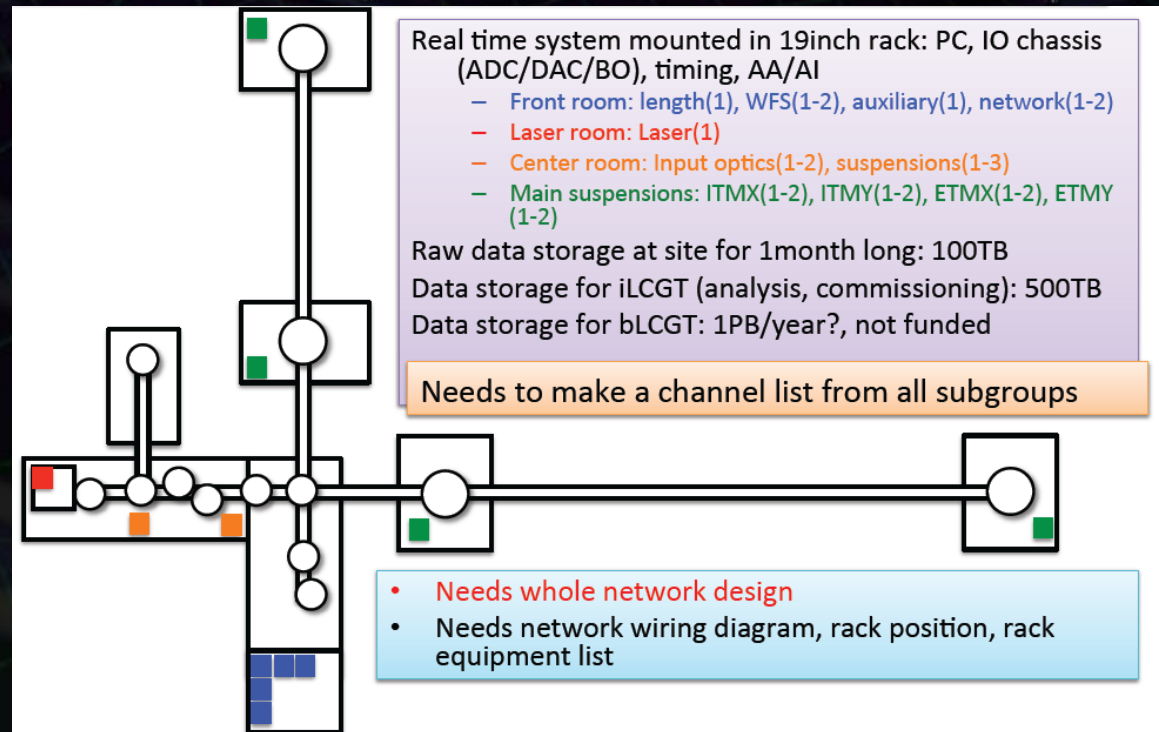
- aLIGOと同等のシステム

→ 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

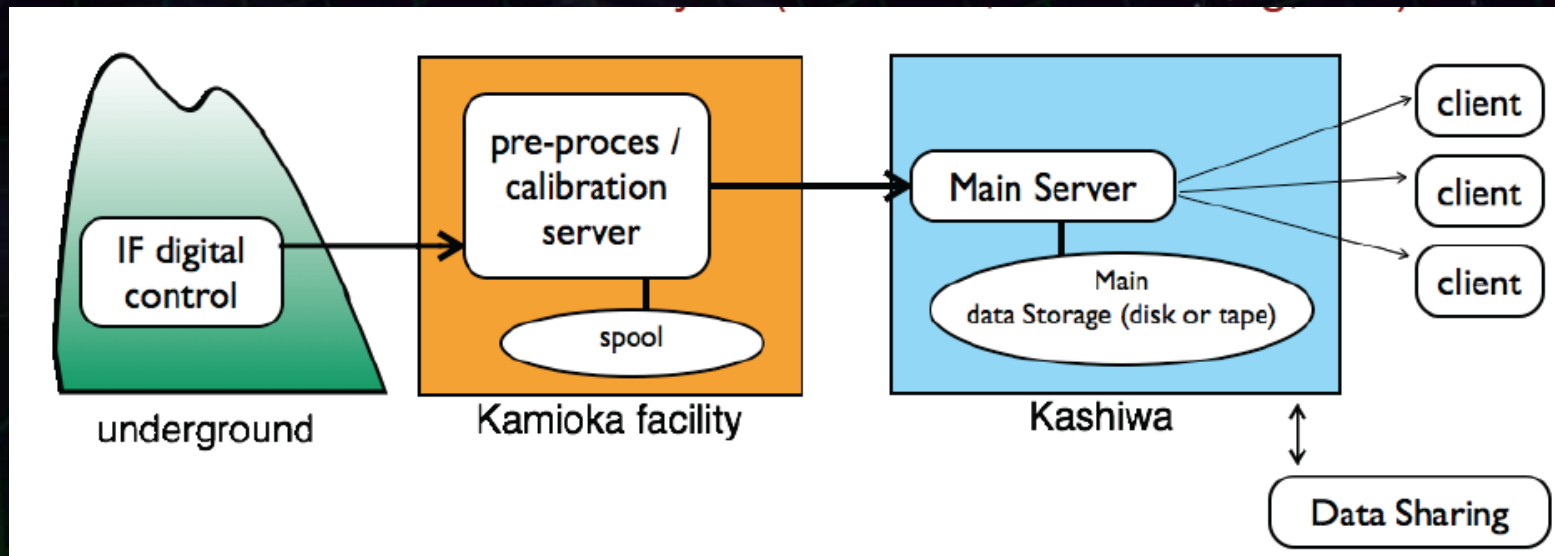


# データ処理・解析

## •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



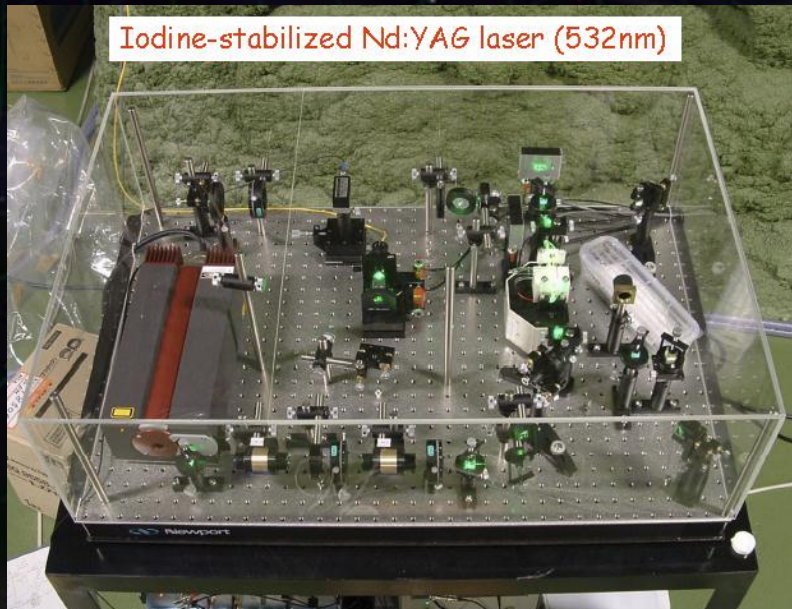
Computing platform and Network



# 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

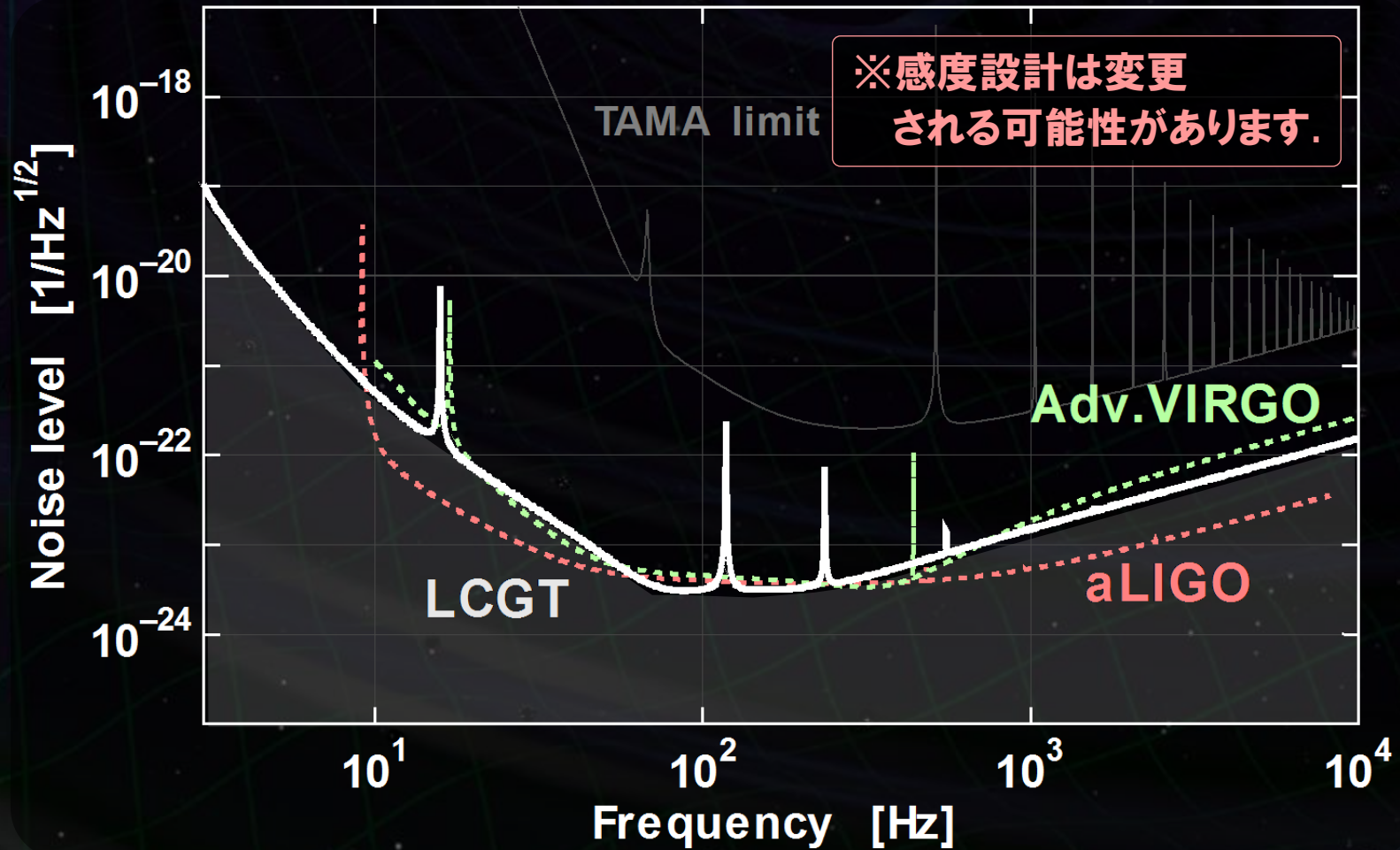


# LCGTの感度限界

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	~ 2021
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世代の技術も実証する.  
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