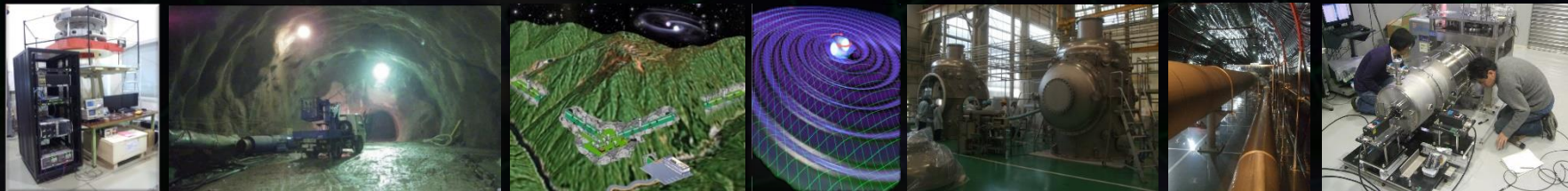


重力波観測

安東 正樹 (東京大学/国立天文台)



重力波による天文学!!!



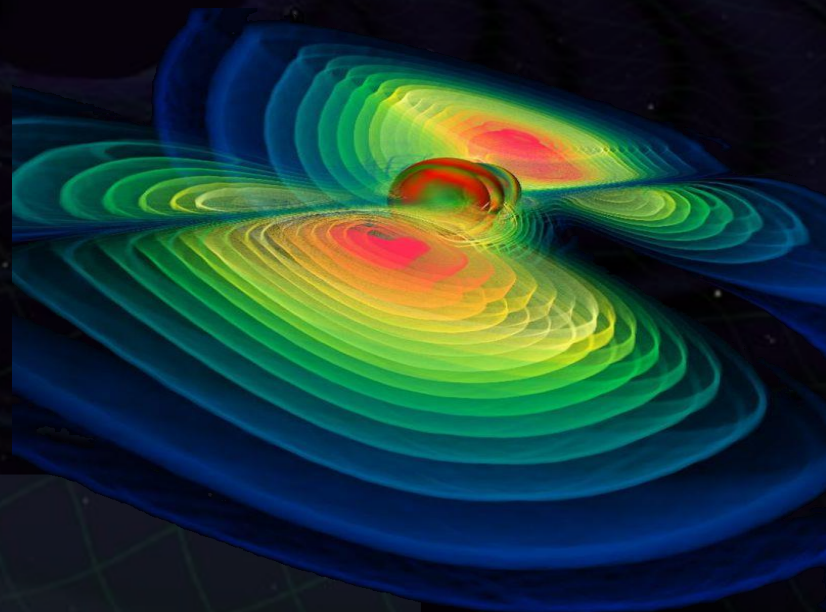
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力



宇宙を観測する新しい手段

- ・電磁波と相補的・独立な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象
(初期宇宙, 高エネルギー天体現象の内部)

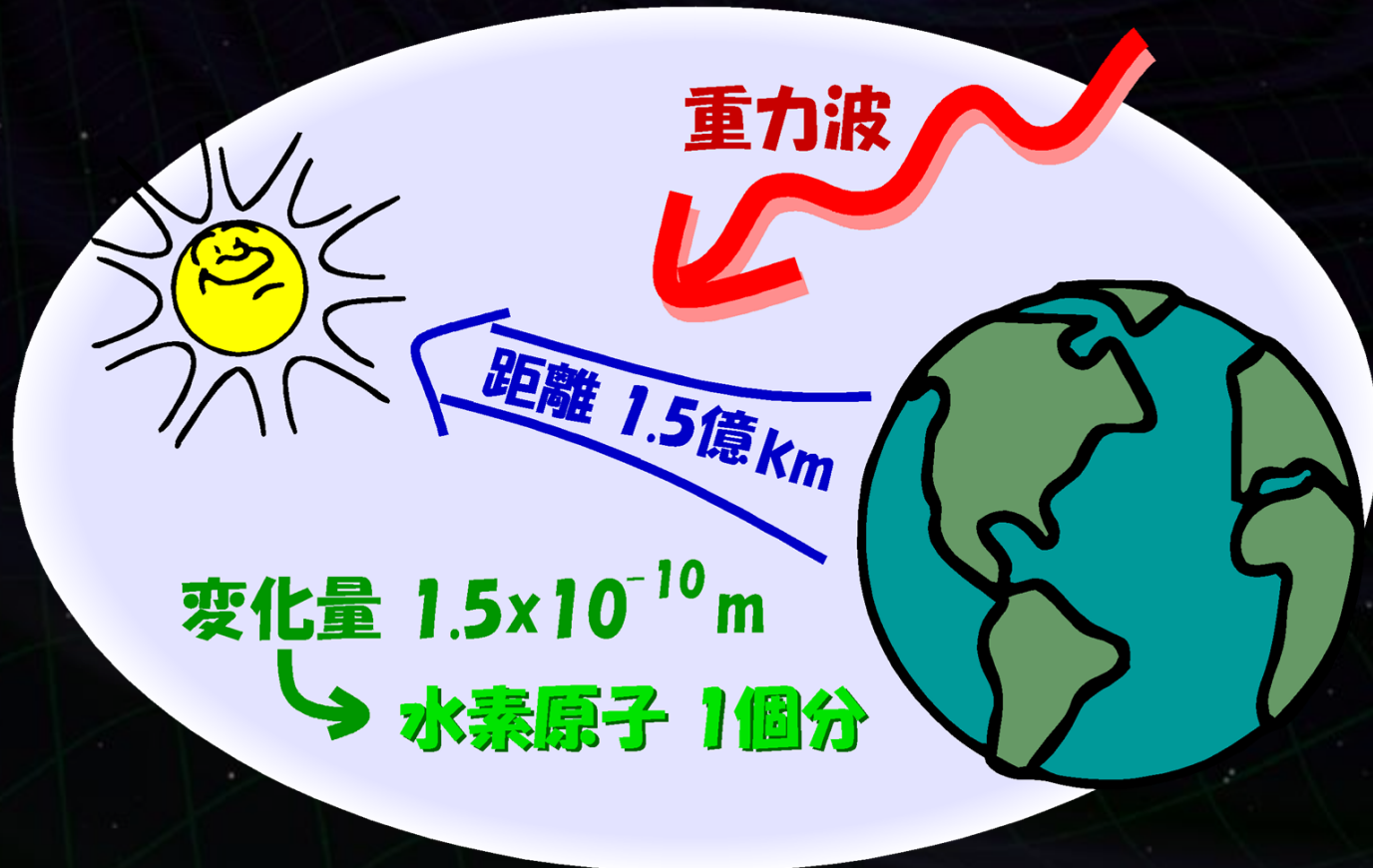


重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

重力波の効果：2点間の固有距離の変化



レーザー干渉計型重力波検出器

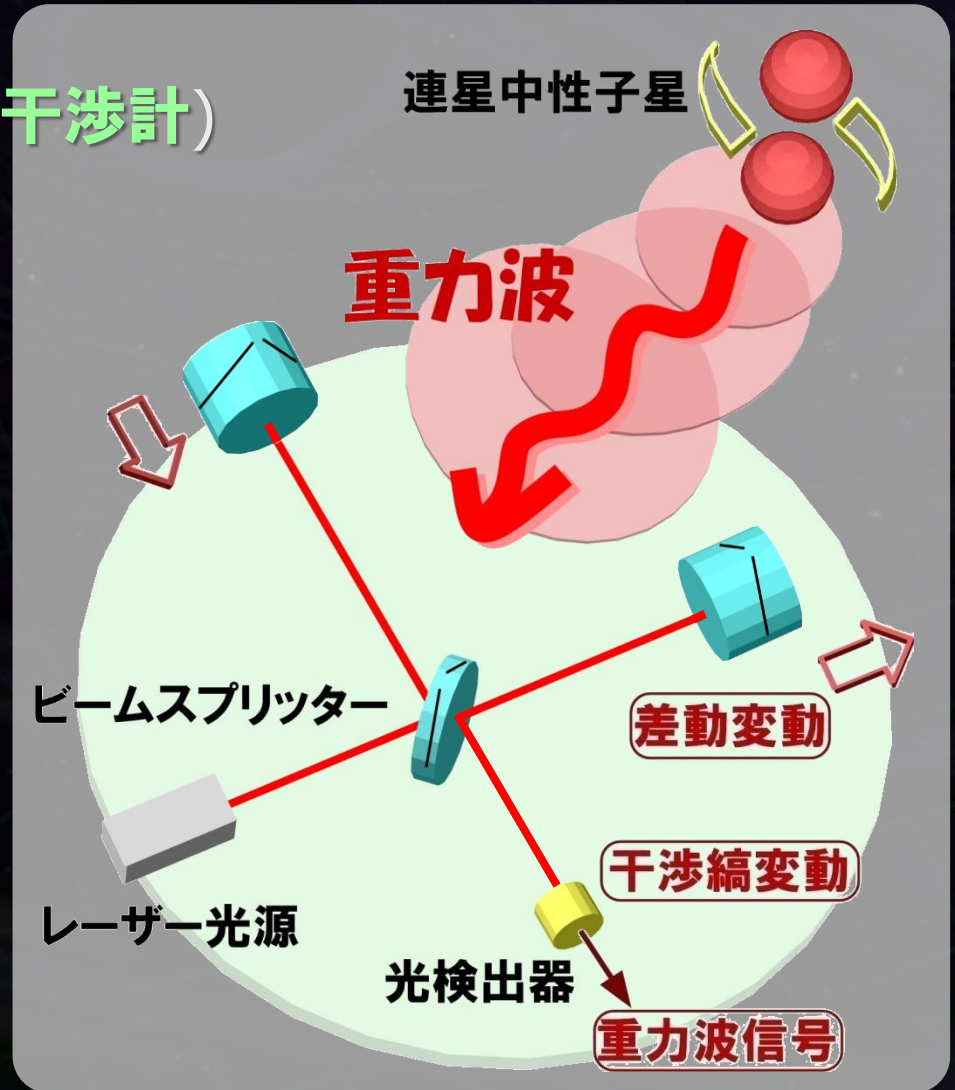
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干渉.
- 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

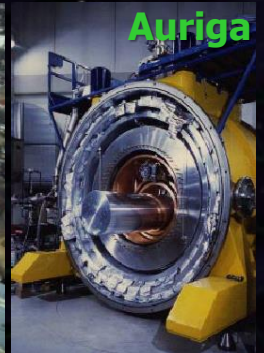


第1世代 重力波検出器

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

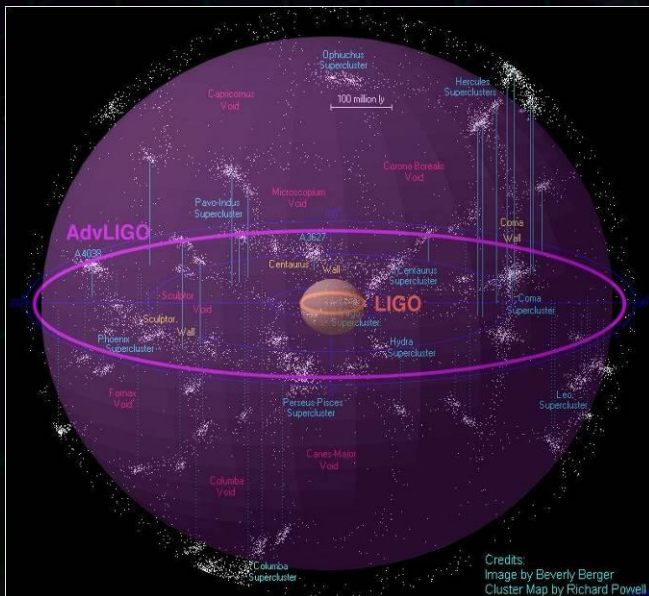
→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

第一世代の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

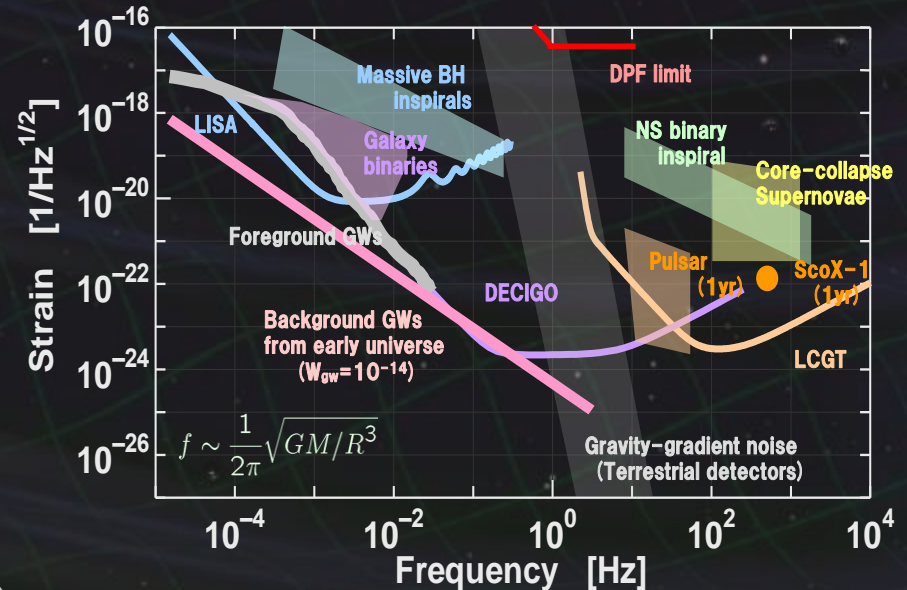
ただ... そのような重力波イベントは稀 (10^{-5} - 10^{-3} event/yr)

⇒ 次世代の重力波望遠鏡

高感度化 (KAGRAなど)
→ より多くの銀河をカバーする



観測帯域を広げる (LISA/DECIGO)
→ 定常的・大振幅の重力波



約1桁感度を向上した 第2世代の地上重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバー



感度が10倍向上

→ イベントレートは 10^3 倍



第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

大型低温重力波望遠鏡



重力波天文学の創成



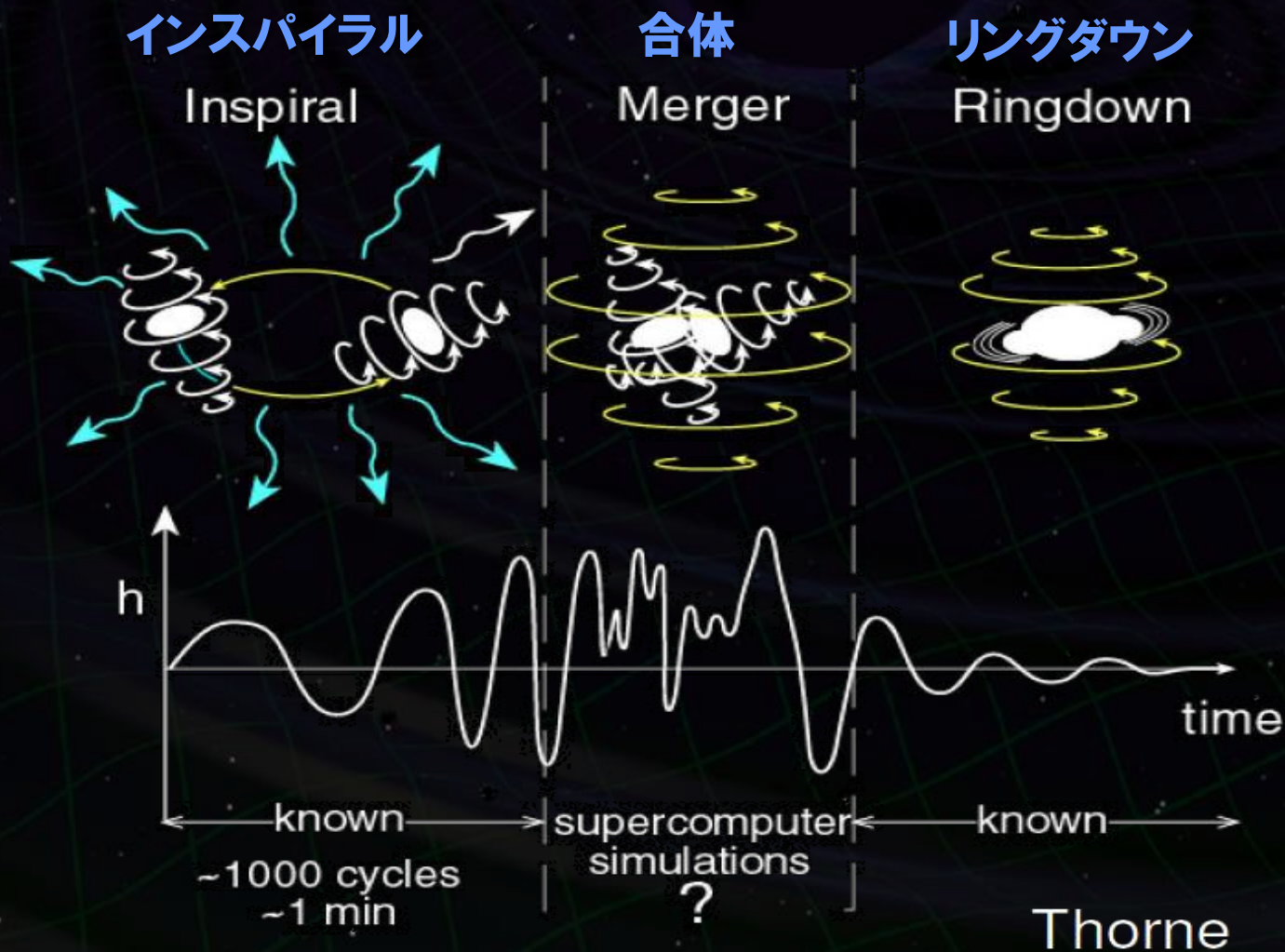
大型低温重力波望遠鏡

かぐら (KAGRA)

岐阜県・神岡で建設中の
次世代重力波検出器
(本格観測 2017年-)

連星合体現象からの重力波

KAGRAの第一のターゲット：連星合体からの重力波



• 重力波の初検出 → 新しい天文学の創生.

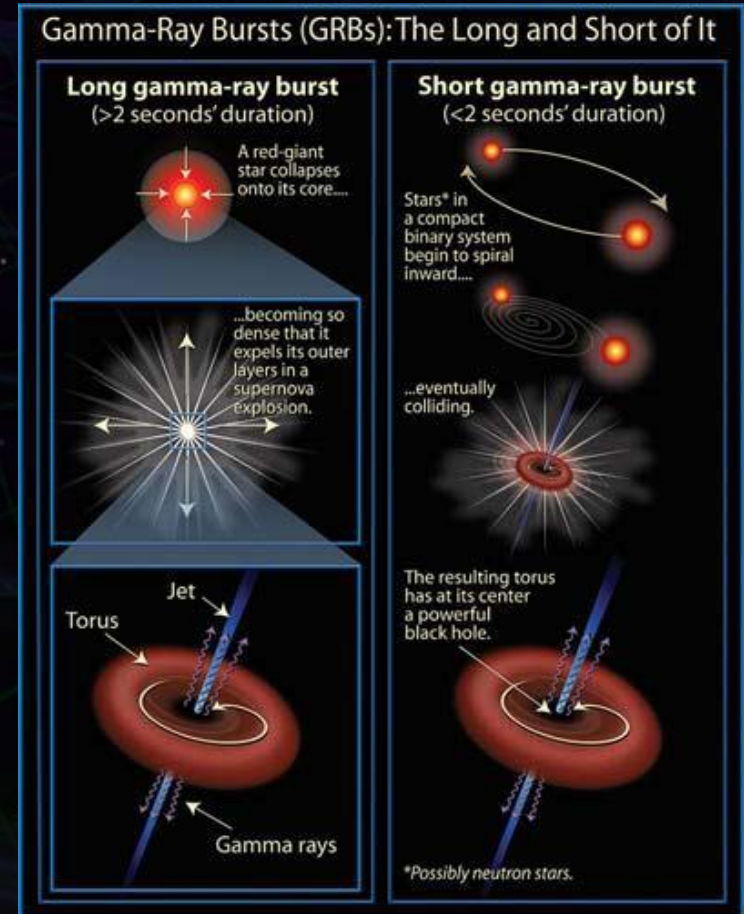
- 連星中性子星 : 確実に存在, 波形予測可能.
- ガンマ線バーストの起源, 未知の発見.
- 相対性理論/重力法則の検証.

• 高密度核物質の直接探査.

- 中性子星の状態方程式の情報.
- r-過程 → 元素組成・宇宙の化学進化.

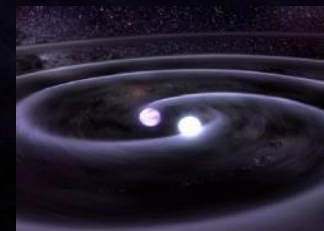
• 宇宙論・銀河形成史に対する知見.

- 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



From encyclopedia of science

連星中性子星合体からの重力波観測



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 ~ 200 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 **>1 events/yr**

合体レートの見積もり

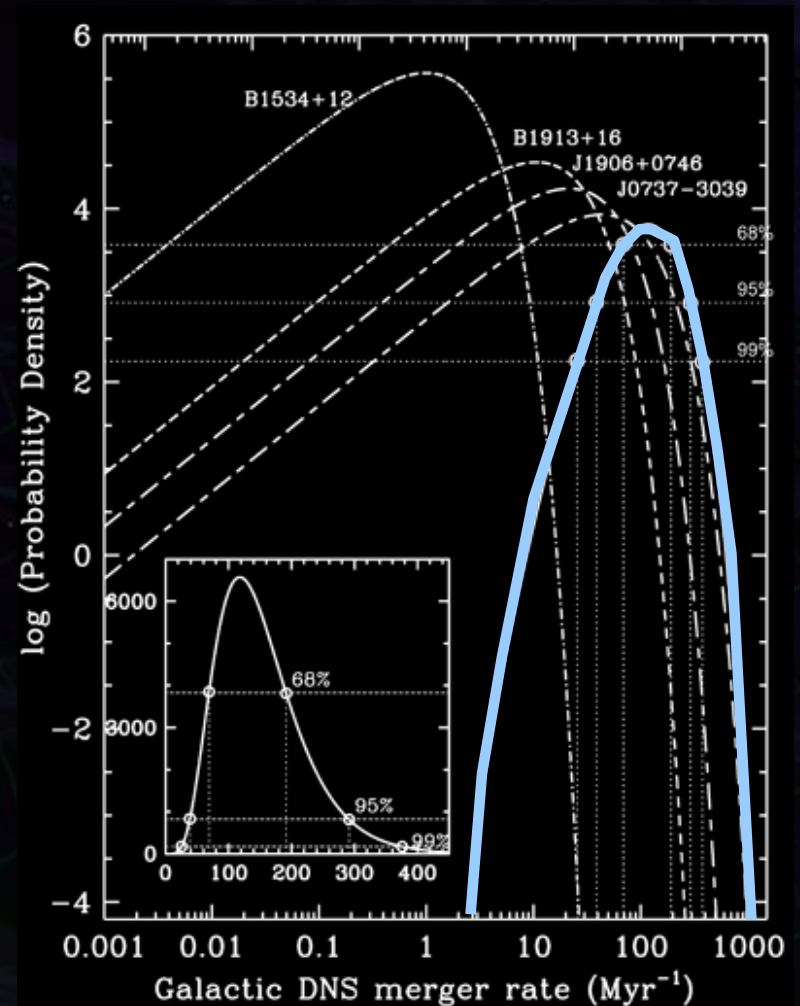
Kalogera+, ApJ (2004), Lorimer, LRR (2008), Kim+ (2008)

- 宇宙年齢以内に合体するDNS 4つ
- 各'種類' → 銀河系内の数を見積もる。
 - 連星の寿命, 明るさ
 - パルサー探査で見つけられる確率
 - 銀河系内の分布モデル
- + その種類の連星系が
1つ見つかったという観測事実.



銀河系あたりの合体レート

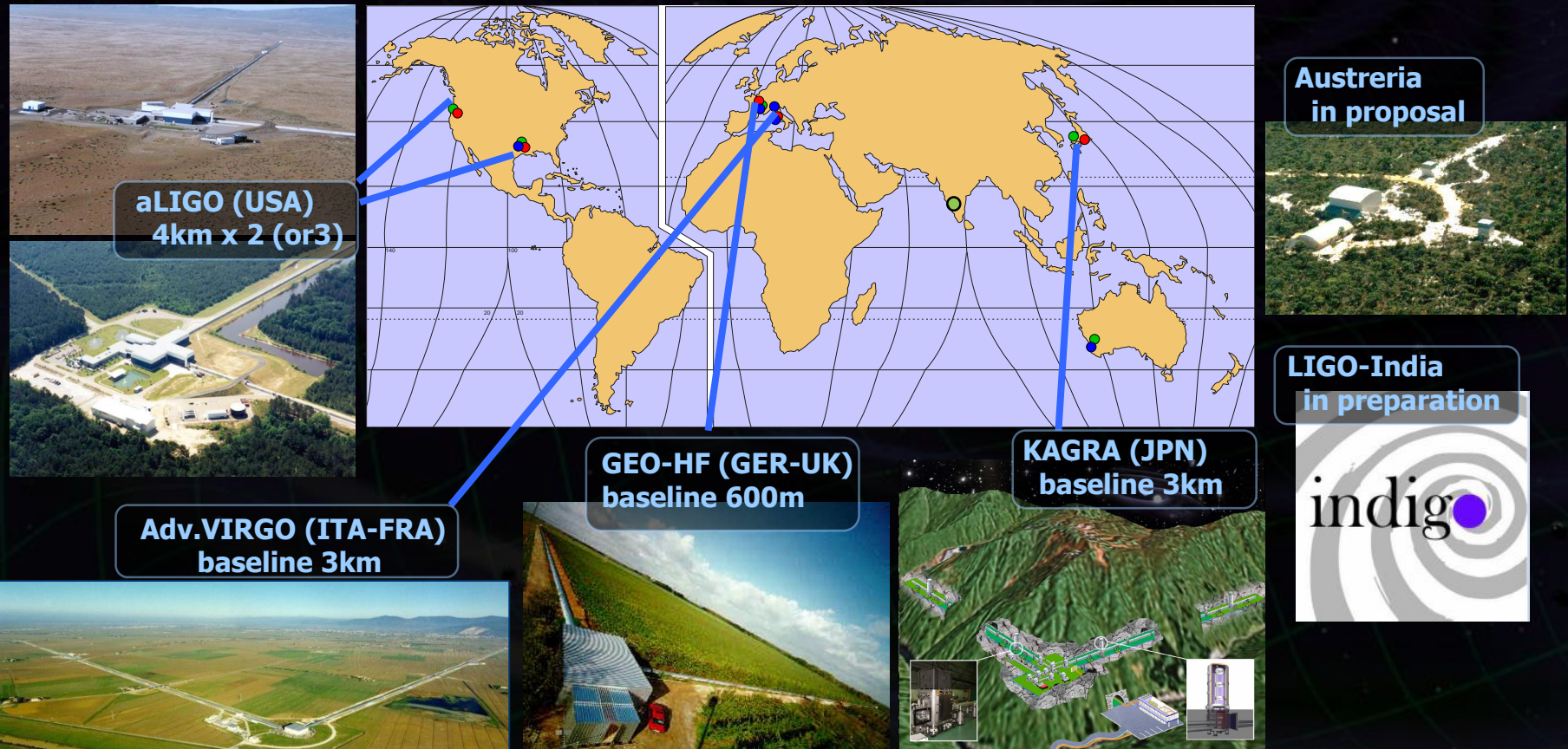
$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} [\text{events/Myr}]$$



第2世代 重力波望遠鏡

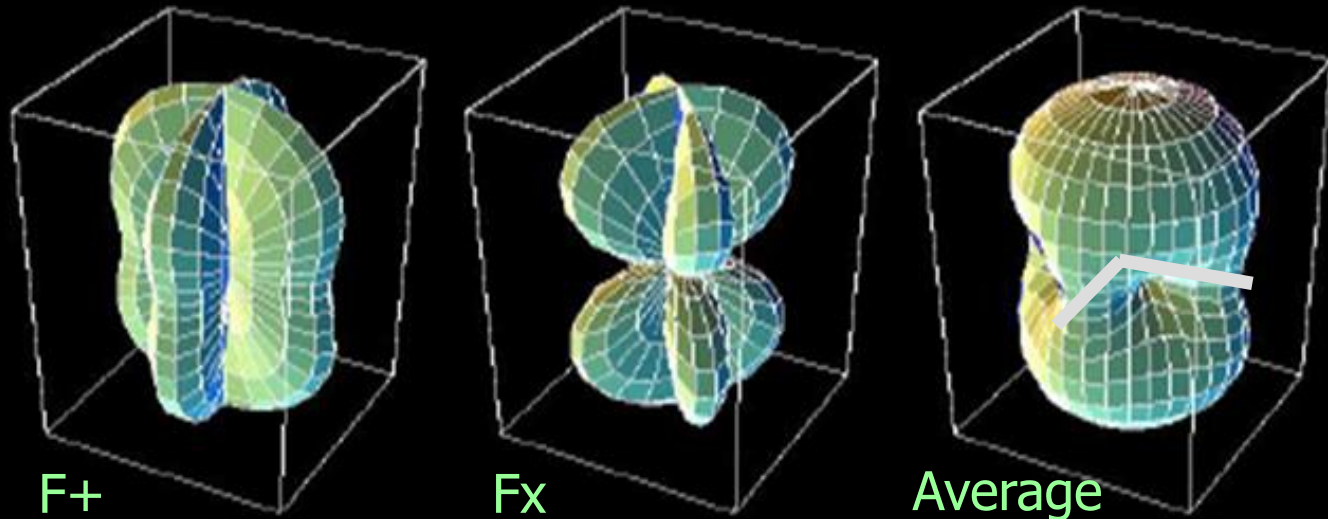
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 物理情報, ...)



干渉計型重力波検出器: 指向性・偏波依存性が小さい。

干渉計のアンテナパターン



⇒ 1台の干渉計で重力波源を特定することはできない。

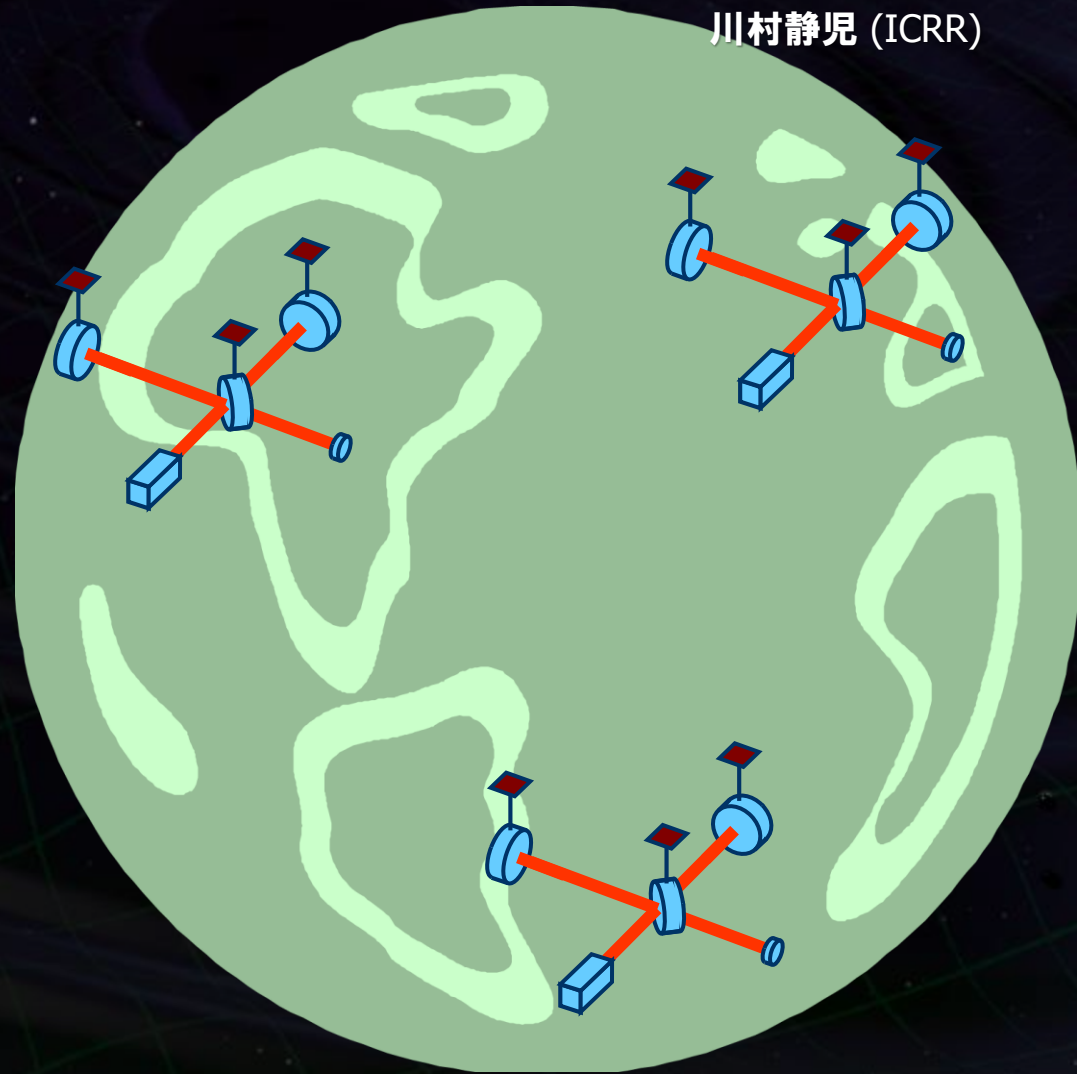
国際観測網での同時観測

アニメーション：
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測



到着時間の差から
波源の方向が分かる！

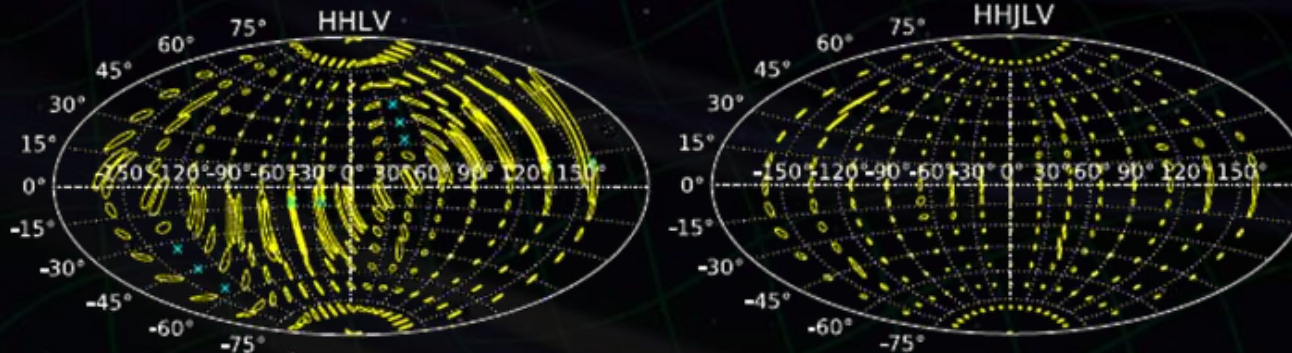


天球上の角度分解能

NS-NS coalescence @180Mpc (95%CI)		
(1.4,1.4)Msun	LHV	LHV K
median of $\delta\Omega$ [Deg ²]	30.25	9.5

H: LIGO--Hanford
 L: LIGO--Livingston
 V: Virgo,
 K: KAGRA
 I: LIGO-Indea

From presentation by H. Tagoshi
 J.Veitch+, PRD85, 104045 (2012)
 Tagoshi+ (2014)



S.Fairhurst
 CQG 28(2011) 105021

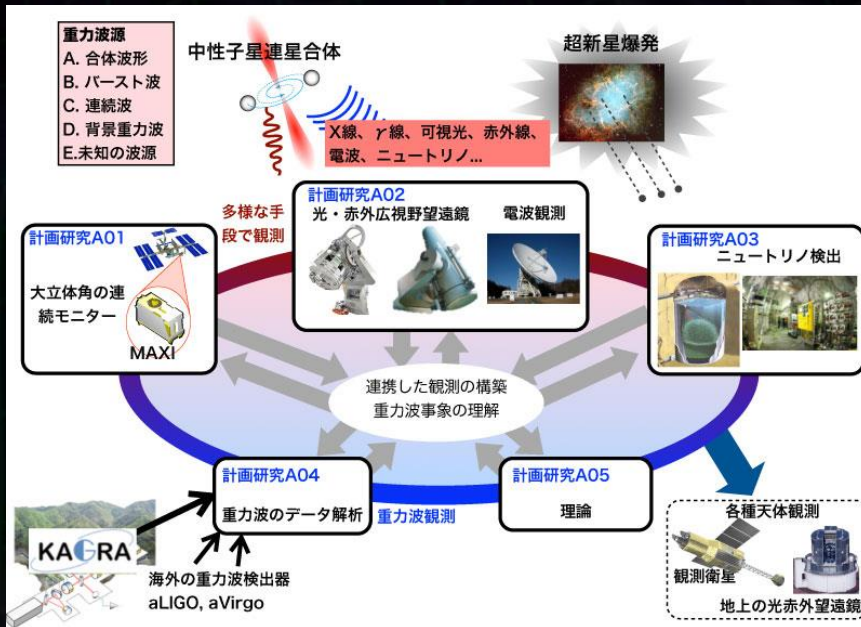
Adding **KAGRA** to (aLIGO + adv. VIRGO) network
 → Factor $\sim 3-4$ improvement in sky area

・新学術領域研究

「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」

→ 重力波の理論・データ解析, X線・光赤外・電波,
ニュートリノによる突発天体観測.

・KAGRA, LIGO, VIRGO間のMoU → データの共有へ.



領域HPより

19-Sep-12

Memorandum of Understanding

between

KAGRA, LIGO and Virgo Scientific Collaborations

A. Purpose of the agreement:

The purpose of this Memorandum of Understanding (MOU) is to establish a collaborative relationship between the signatories who are seeking to discover gravitational waves and pursue the new field of gravitational wave astronomy. The main scientific motivation is that the maximum return from gravitational wave observations is through simultaneous joint measurements by several instruments.

KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -



大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (かぐら)

目的: 重力波の初検出と重力波天文学の創生.

特徴: 第2.5世代干渉計 (低温干渉計, 地下サイト).



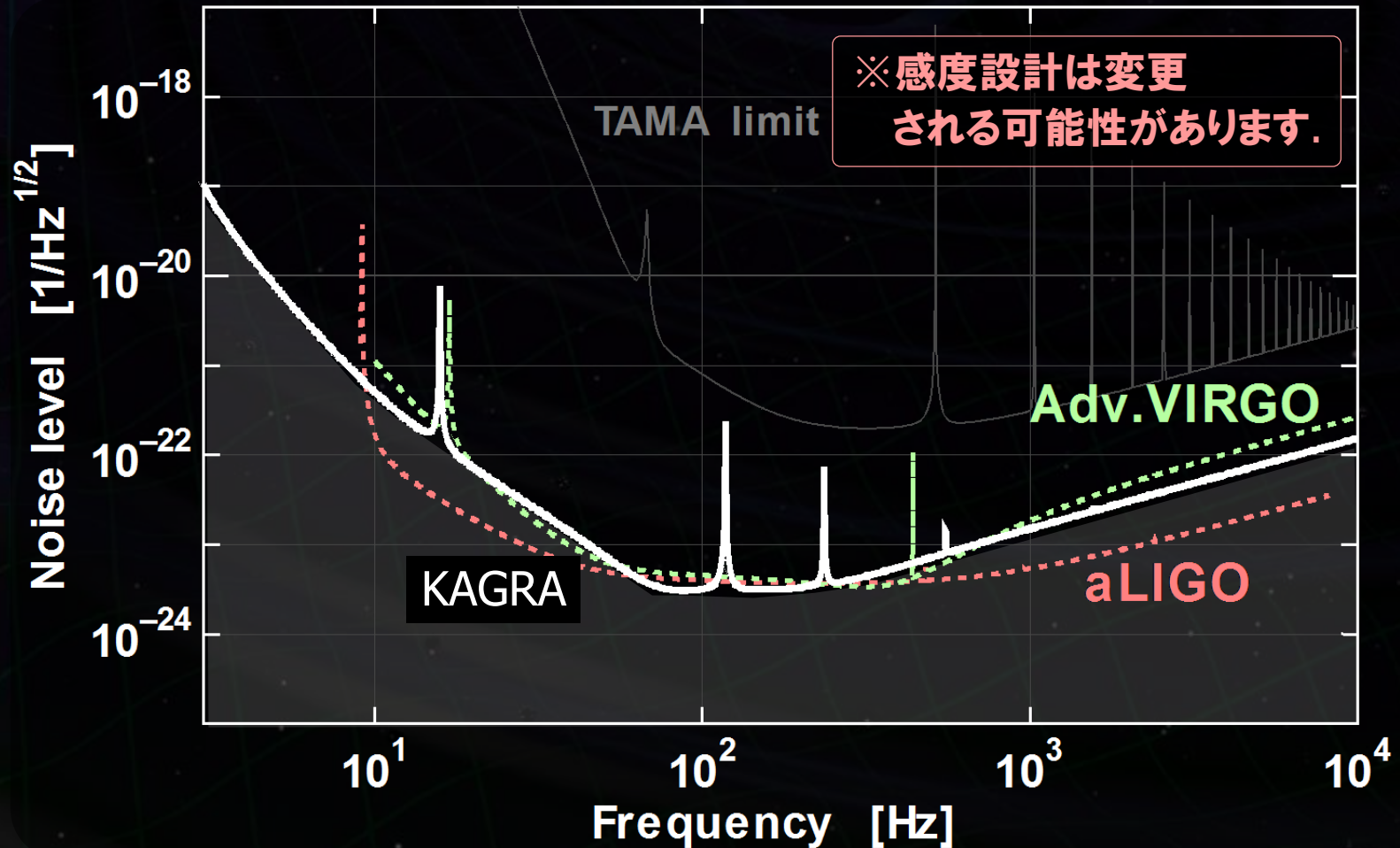
- 2010年「最先端研究基盤整備事業」により建設開始. トンネル掘削等の経費補助.
- 東京大学 宇宙線研究所を中心に国内外 200名以上 (60機関以上)が協力.
- 2017年本格観測開始.

KAGRA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1回以上の重力波検出



重力波望遠鏡の比較

	2 nd -generation detectors		3 rd generation	
	aLIGO	Ad. VIRGO	KAGRA	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) 連星中性子性合体現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, 変更の可能性がある.

KAGRAスケジュールと予算



FY2010

FY2011

FY2012

FY2013

FY2014

FY2015

FY2016

FY2017

「最先端研究基盤整備事業」
(~98億円) → iKAGRA基盤設備

終了

科研費 特別推進研究
(~5億円) → 低温・高感度化, 人件費

建設

トンネル掘削経費 (~37億円)

終了

概算要求 (~20億円)
→ 設備準備

部分採択

予算・主旨

研究協力

新学術領域研究

(~8億円, ~3億円 for GW) → マルチメッセンジャー天文学

拠点形成事業 (<1億円) → 国際協力

KAGRA構成



Upgrade



目標

施設・望遠鏡基盤の整備

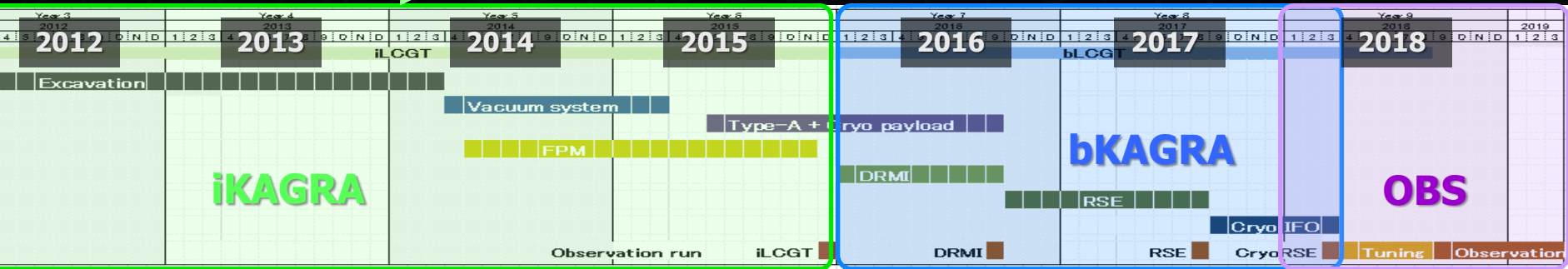
重力波の検出と天文学

KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

Michelson interferometer

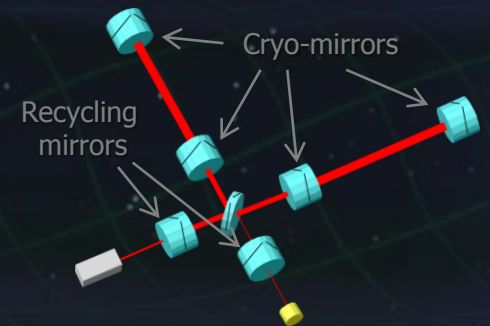
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

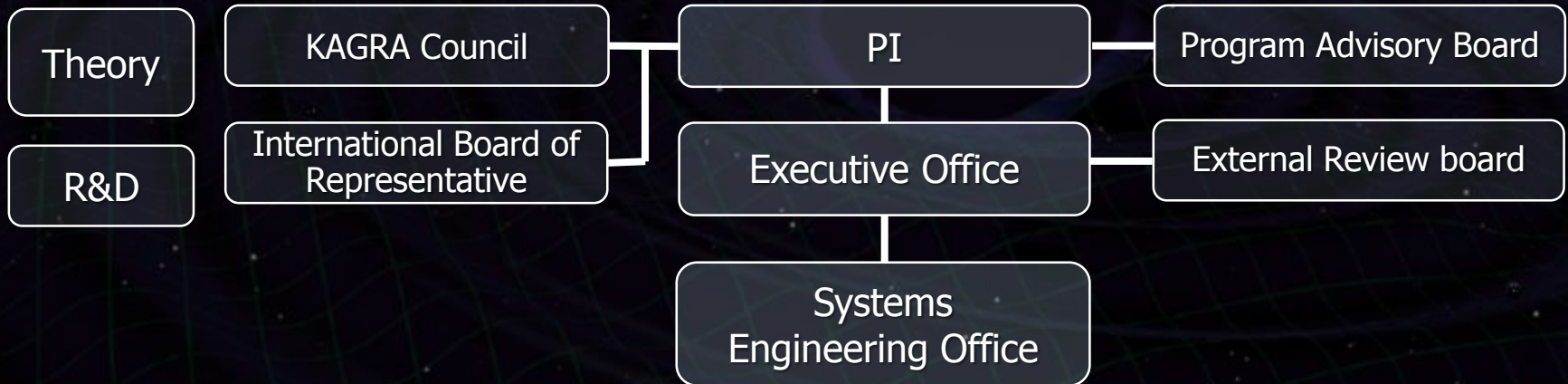
Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.

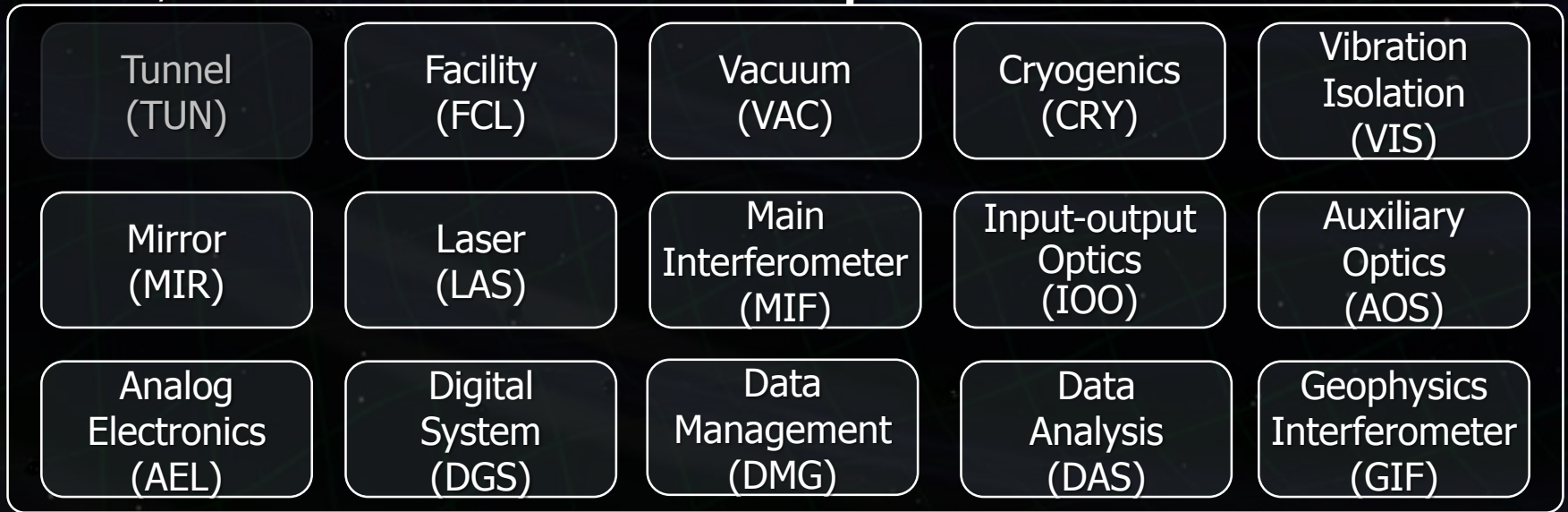


組織図

KAGRA Organization PI: T.Kajita (ICRR), PM: Y.Saito (KEK)



15 Subsystems

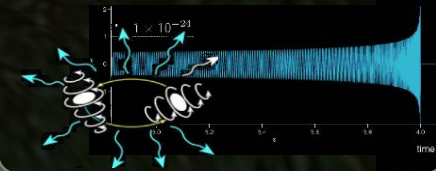


15サブシステム

- Tunnel
- Facility
- Vacuum system



- Data Management
- Data Analysis
- Geophys. IFO



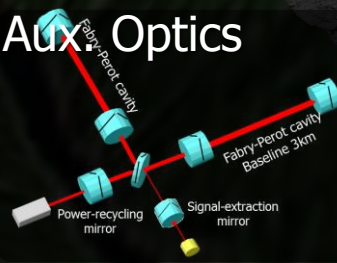
- Laser source
- Mirror



- Seismic iso.
- Cryogenic sys.



- Main IFO.
- In/Output Opts.
- Aux. Optics



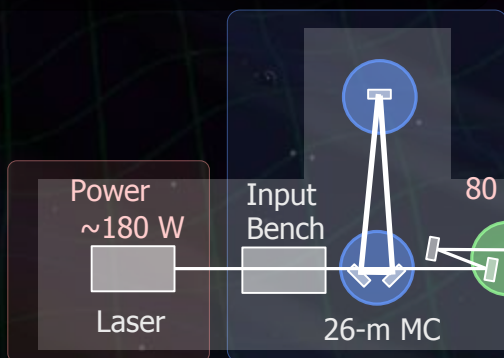
- Analog Elec.
- Digital Elec.



KAGRA 干渉計構成

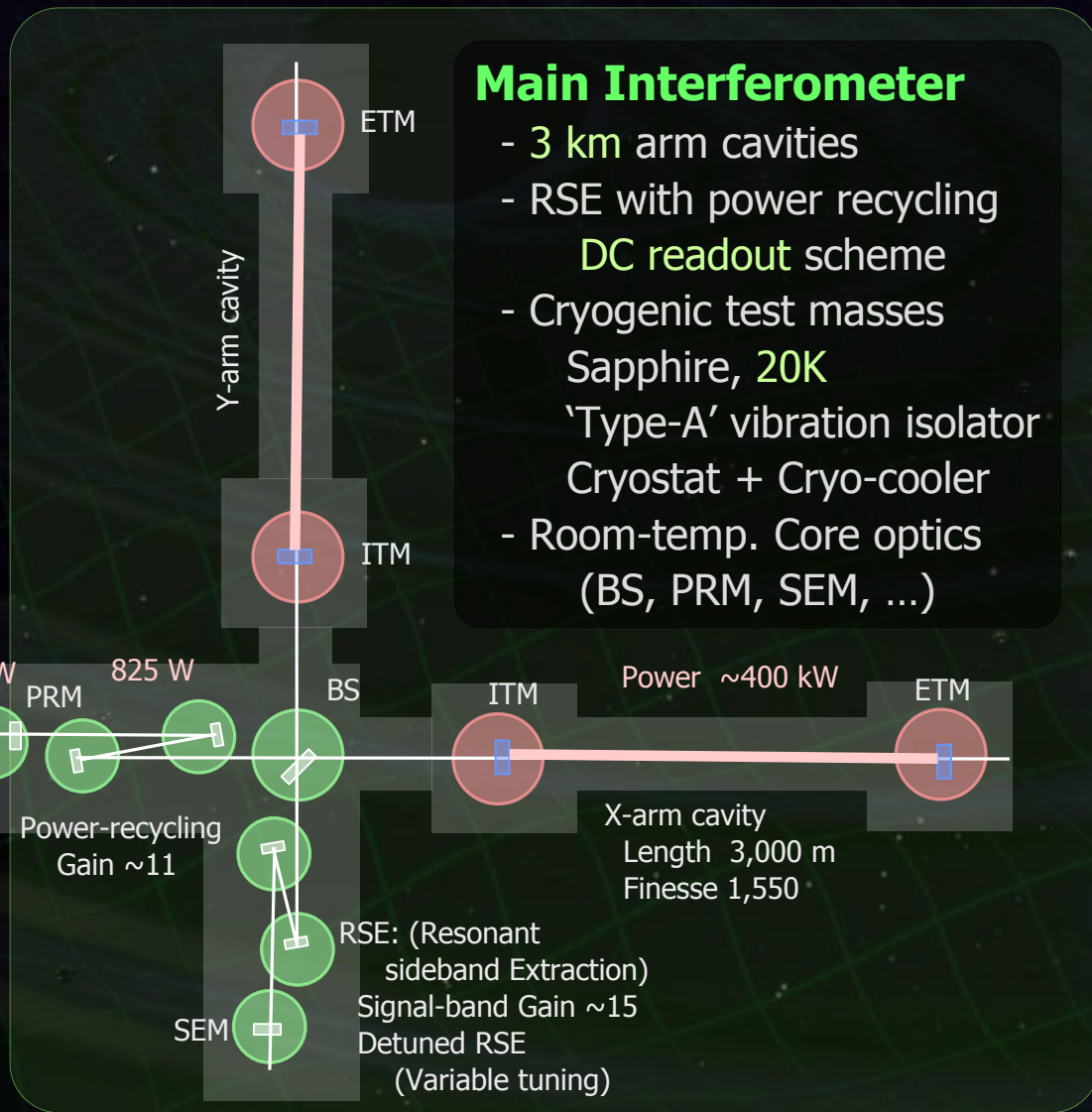
Input/Output Optics

- 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



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.



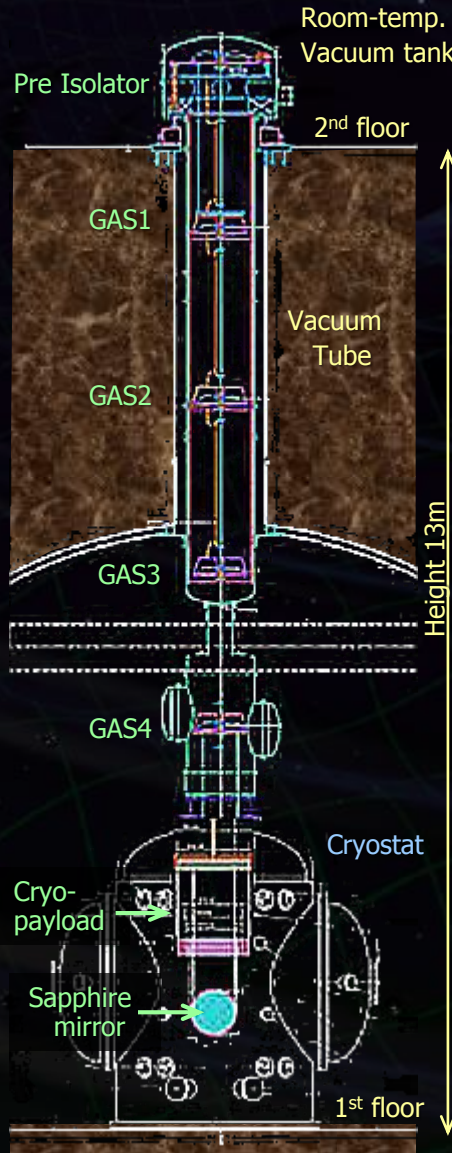
Pre Isolator



GAS filter

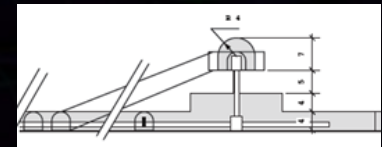
低温ペイロード

- 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.



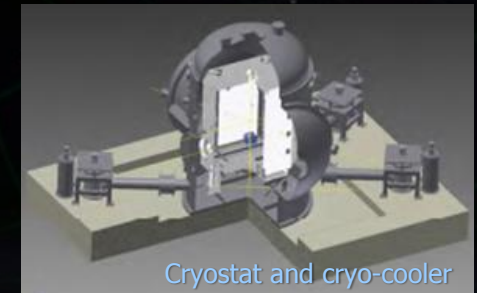
トンネル : 2層構造

- 上部 高さ 7m
- 中間岩盤 厚さ 5m
- 下部 高さ 8m



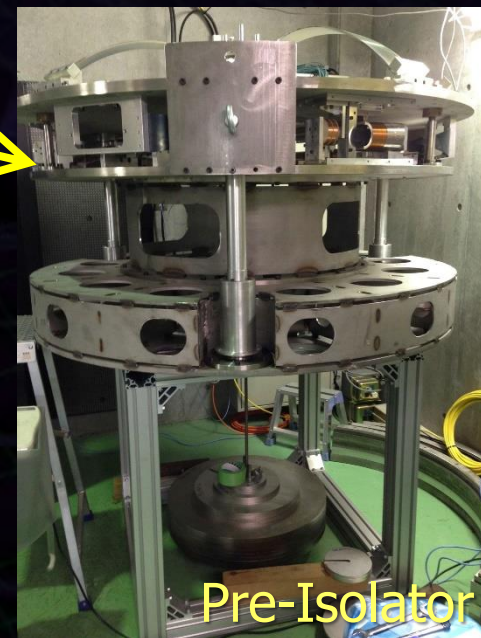
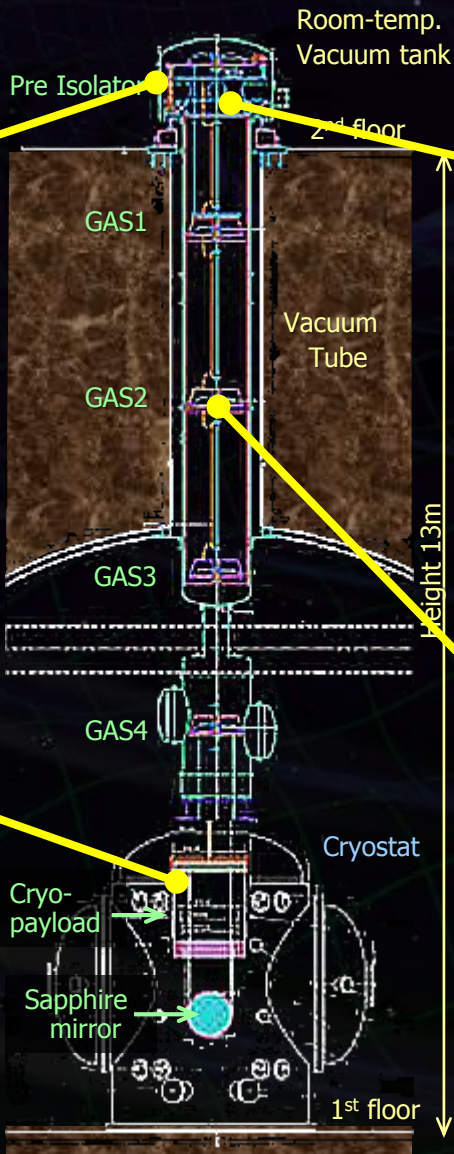
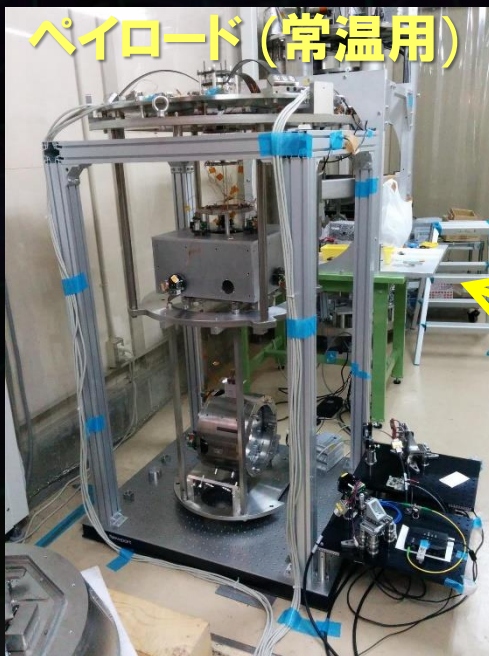
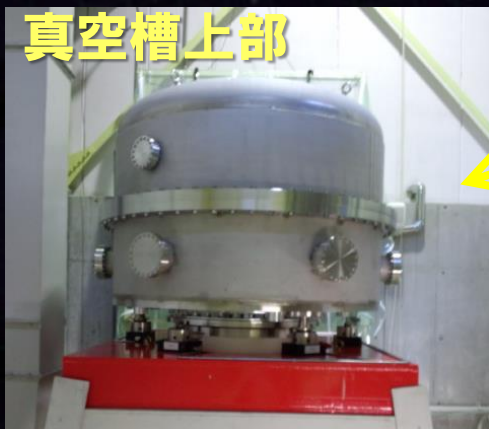
クライオスタット・冷却系

- 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

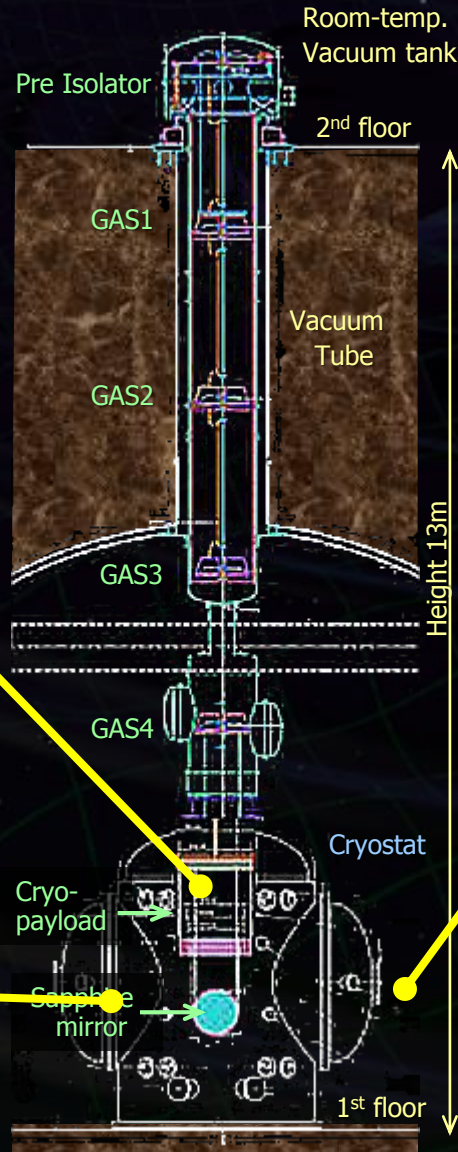
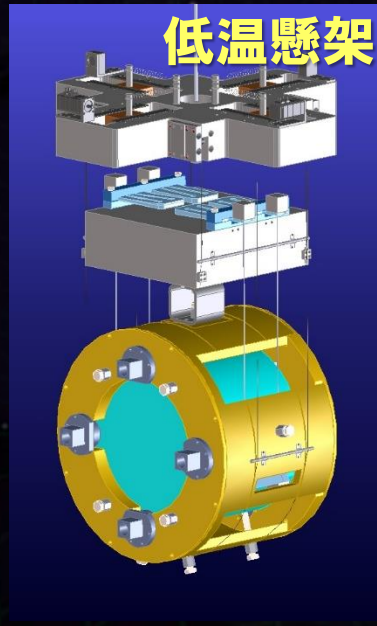


Cryostat and cryo-cooler

防振・懸架装置



低温懸架・冷却系



シールドダクト



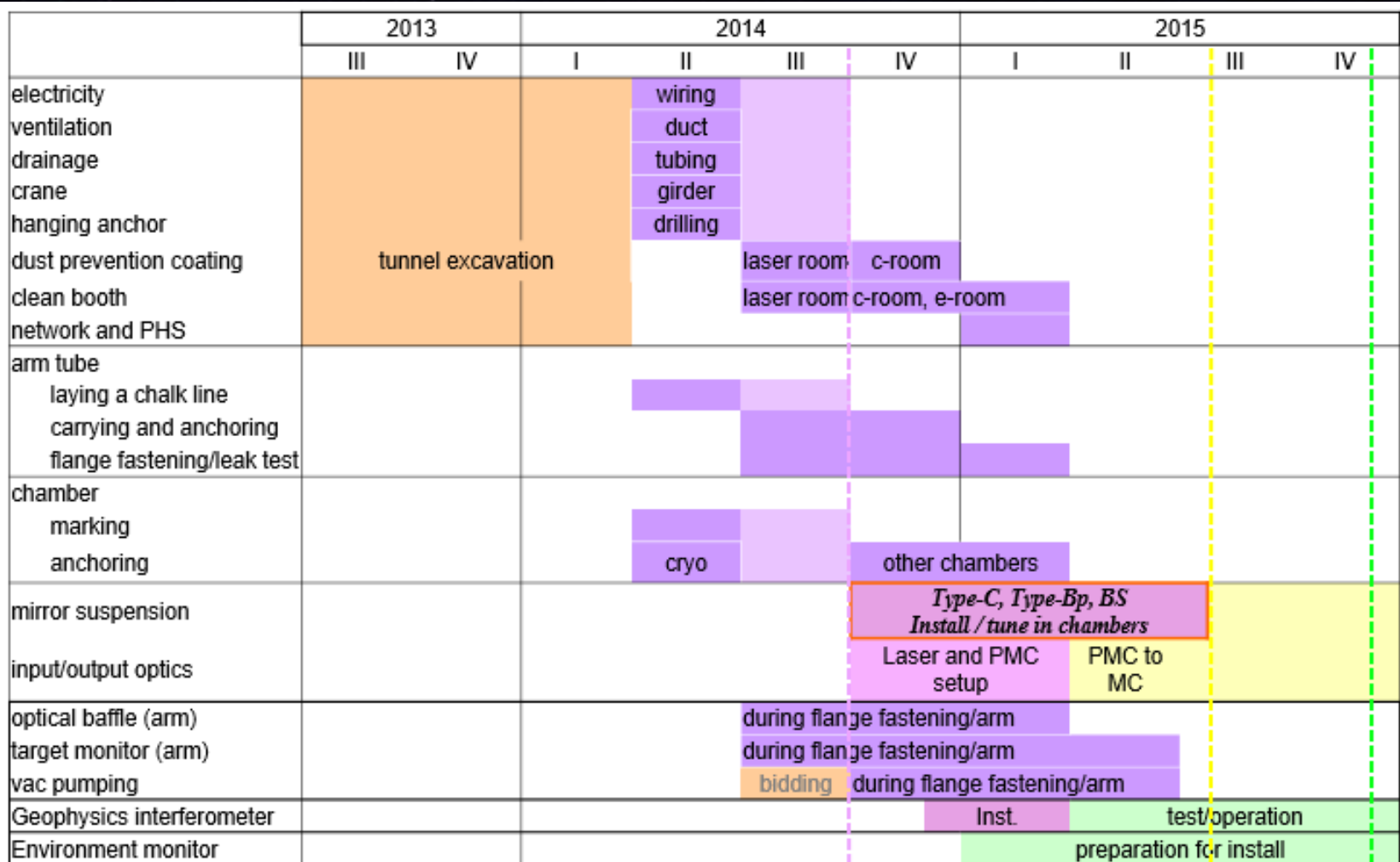
From presentation file
By T.Suzuki + K.Yamamoto

望遠鏡建設中!!!

- KAGRAの現状 -



やや詳細なスケジュール



Oct 2014
input-optics installation

Aug 2015
commissioning

Dec 2015
operation

From presentation file by Y.Saito (Feb. 2015)

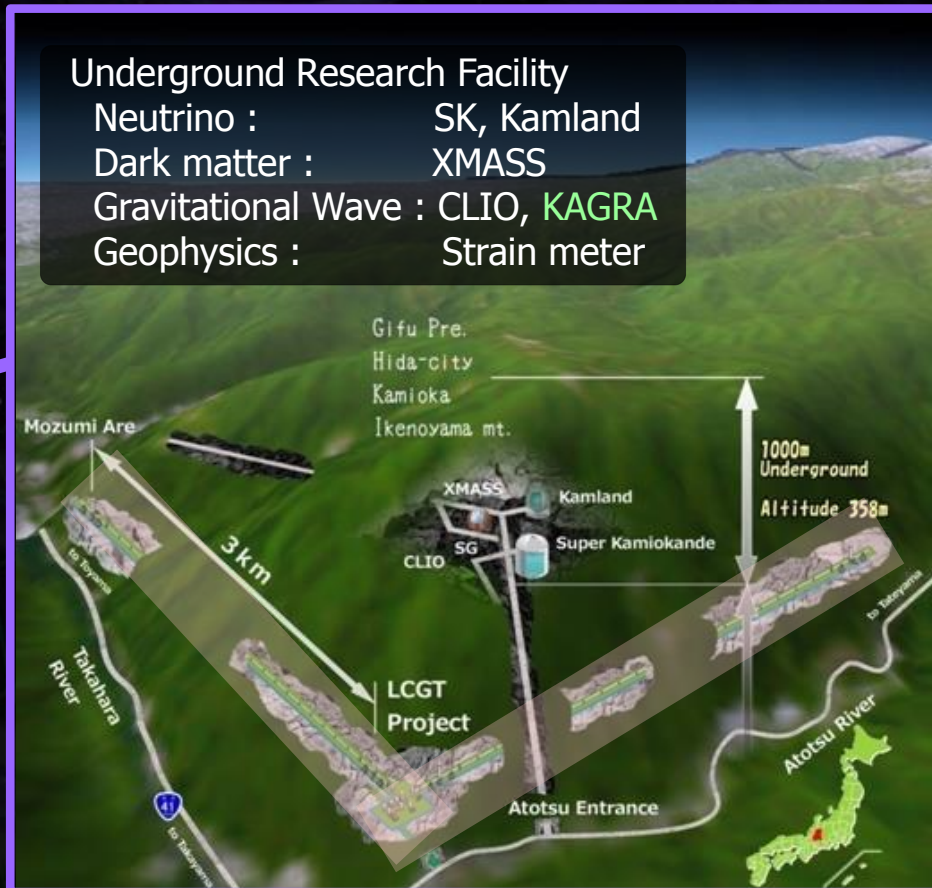
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

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



富山大学から
車で約1時間

Map by Google

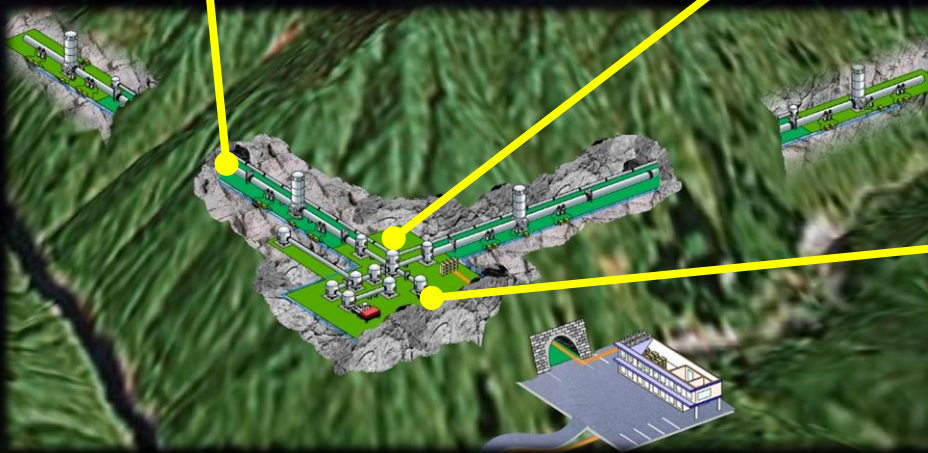


Underground Research Facility
Neutrino : SK, Kamland
Dark matter : XMASS
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**
Geophysics : Strain meter

トンネル掘削工事 (2012年末時点)

センタールーム

Y腕トンネル



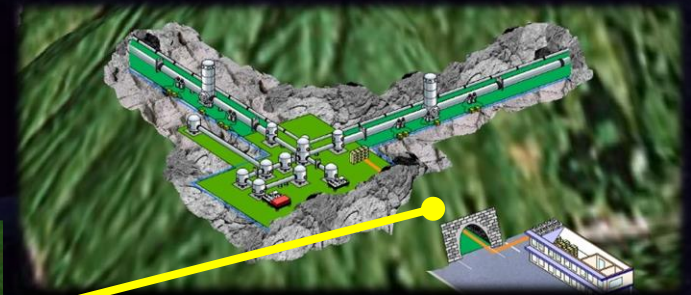
トンネル掘削完成披露会 (2014年夏)



From presentation file by T.Kajita (Dec. 2014)

トンネル内施設整備

中央実験室入口部の壁

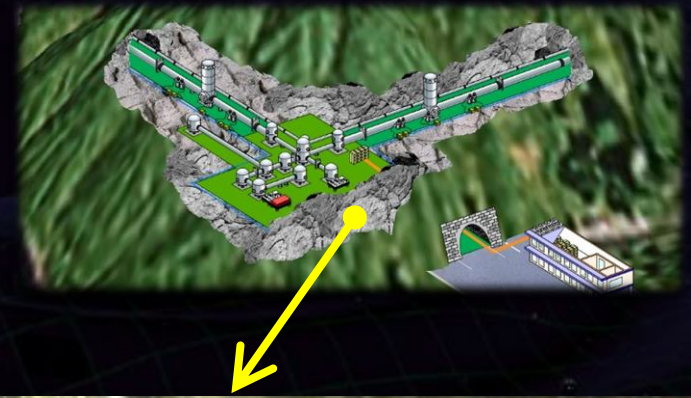


2014年10月の様子

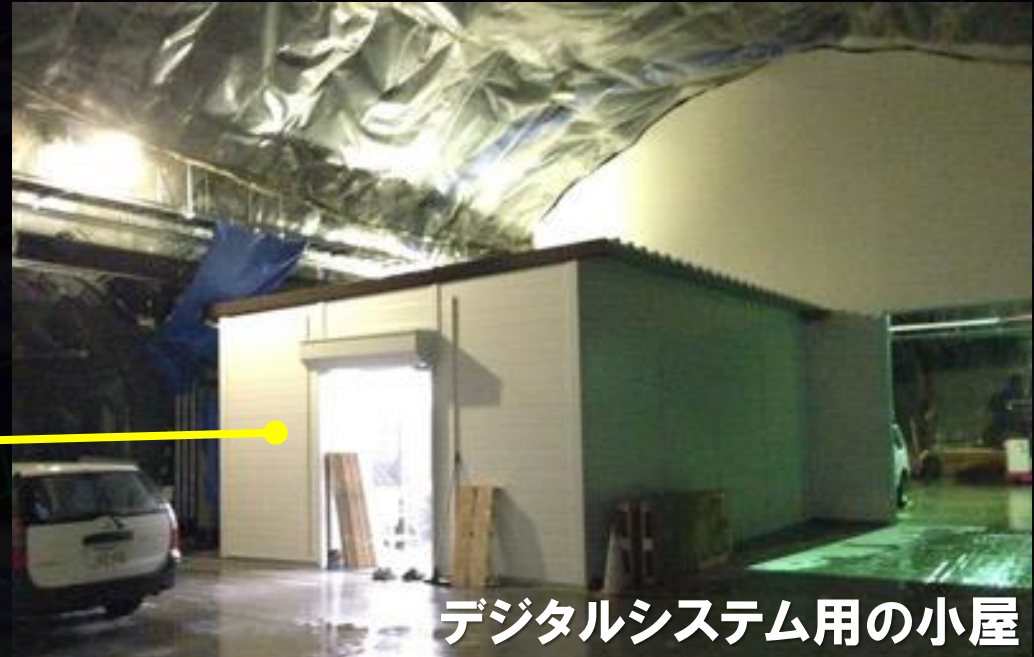


From presentation file by T.Kajita + O.Miyakawa

トンネル内施設整備



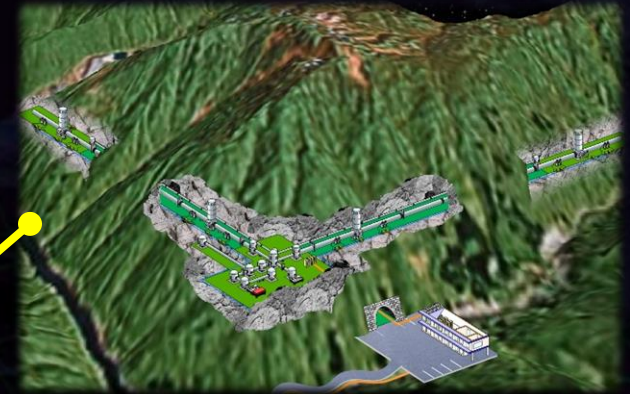
デジタルシステム設置



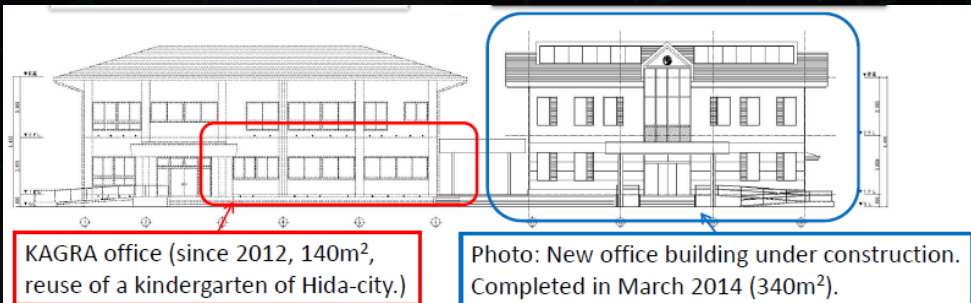
デジタルシステム用の小屋

From presentation file by T.Uchiyama+ O.Miyakawa

神岡オフィス・実験室



- 現地でのオフィス・実験室。
- 坑内と専用回線で接続
→ データストレージ・解析
用計算機を設置。



KAGRA office (since 2012, 140m², reuse of a kindergarten of Hida-city.)

Photo: New office building under construction. Completed in March 2014 (340m²).

真空ダクト

3km x 2本の真空ダクト：
12m, Φ 800mm を478本接続。 → 納品済。

Figures:
Presentation
by Y.Saito (KEK)



Press to form a duct



Bellows for each duct



Installation
test facility



Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka



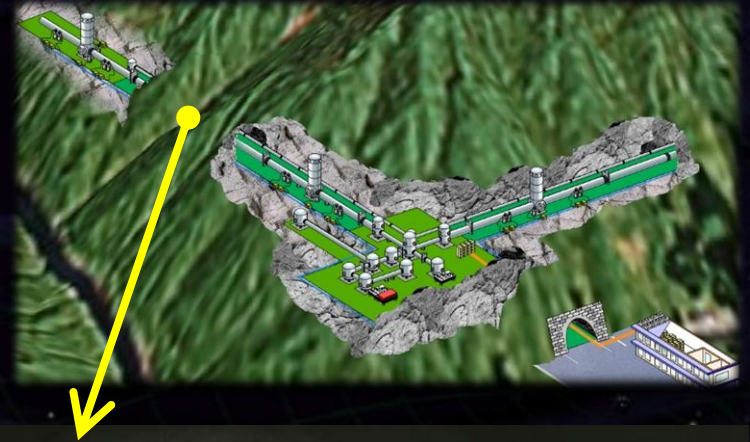
Test at MIRAPRO Co. Noda



Transportation to Kamioka

真空ダクトの搬入

搬入

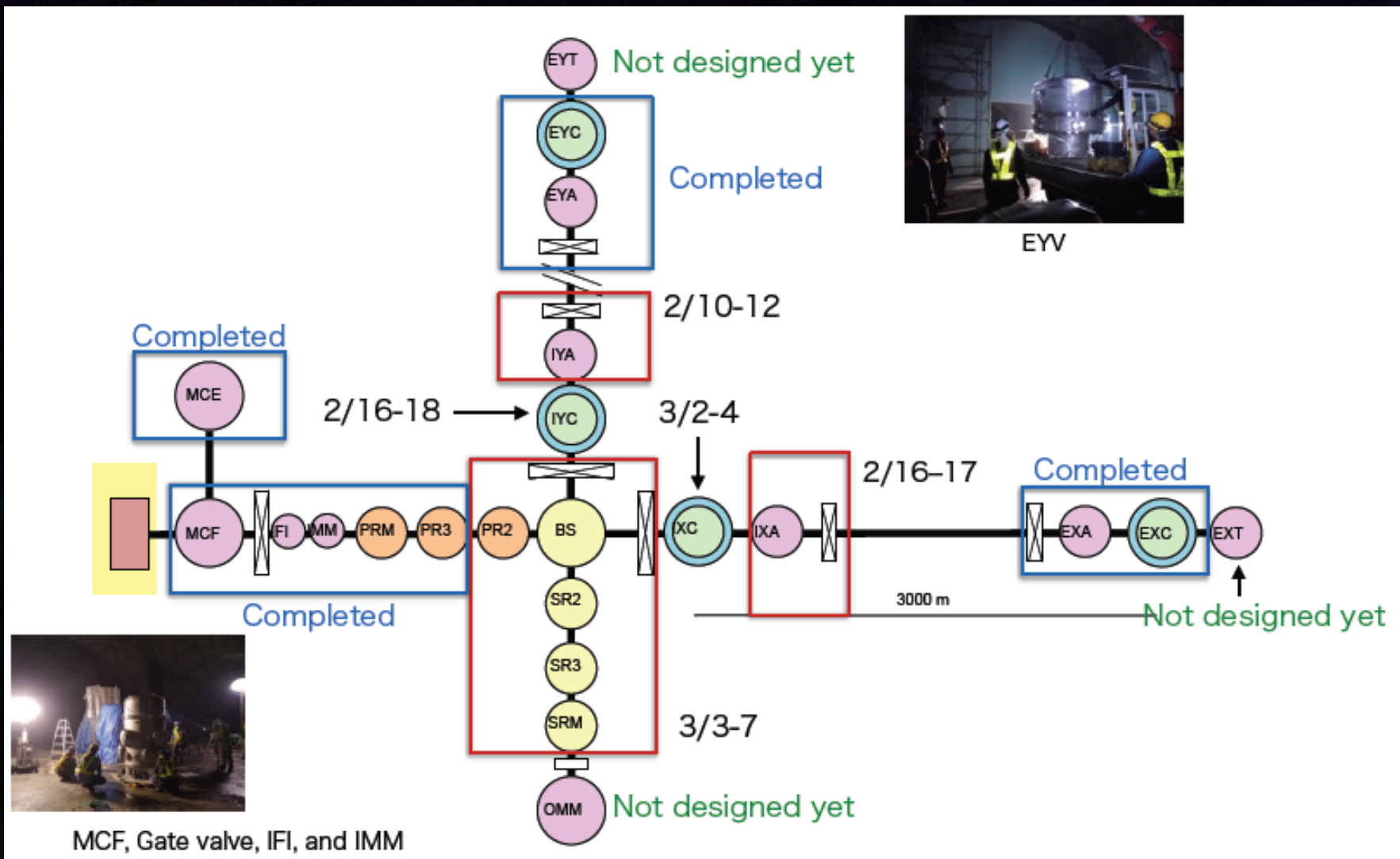


クリーンブース内
でのダクト接続



From presentation file by T.Kajita (Dec. 2014)

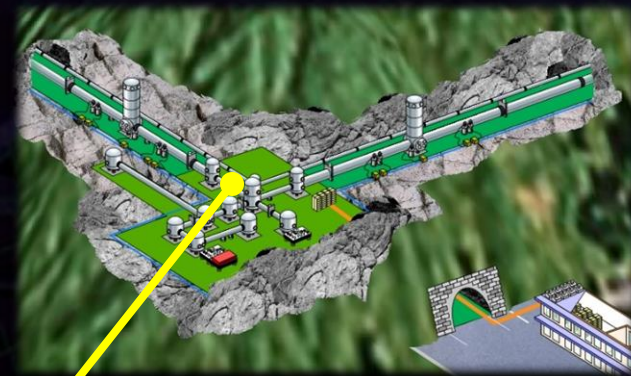
真空槽の設置



From presentation file by T.Uchiyama (Feb. 2015)

真空槽の設置

中央室での真空槽設置.



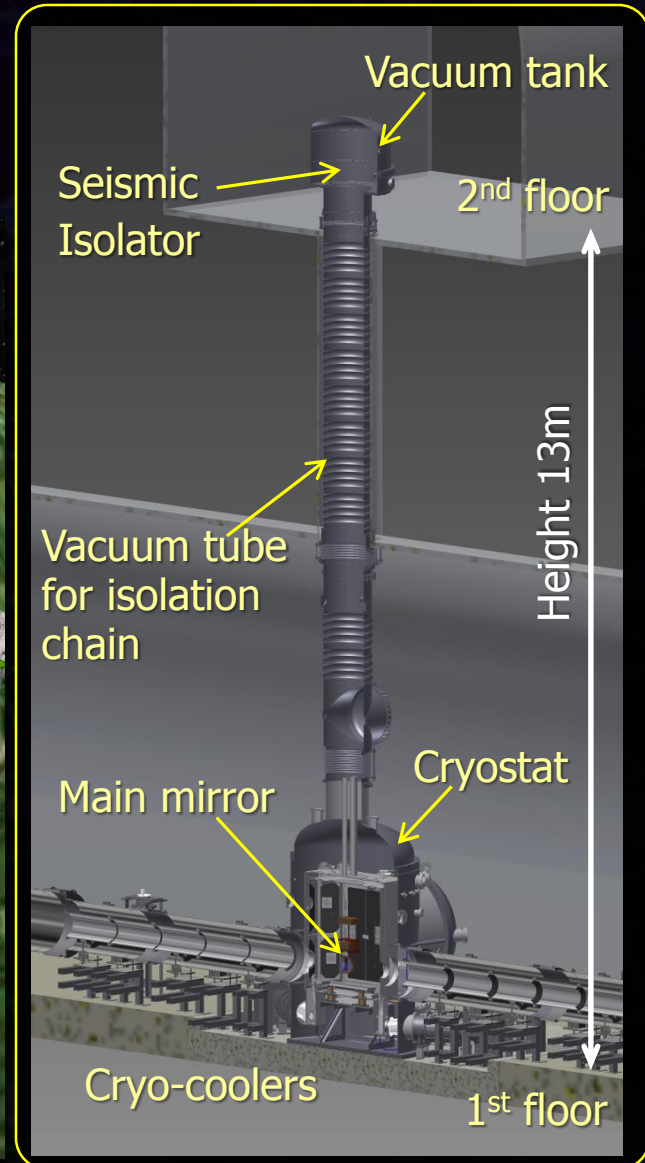
入射光学系用真空槽

レーザー光源用
クリーンルーム

MCエンド

From presentation file by T.Uchiyama + K.Yano (Feb. 2015)

テストマス用クライオスタット



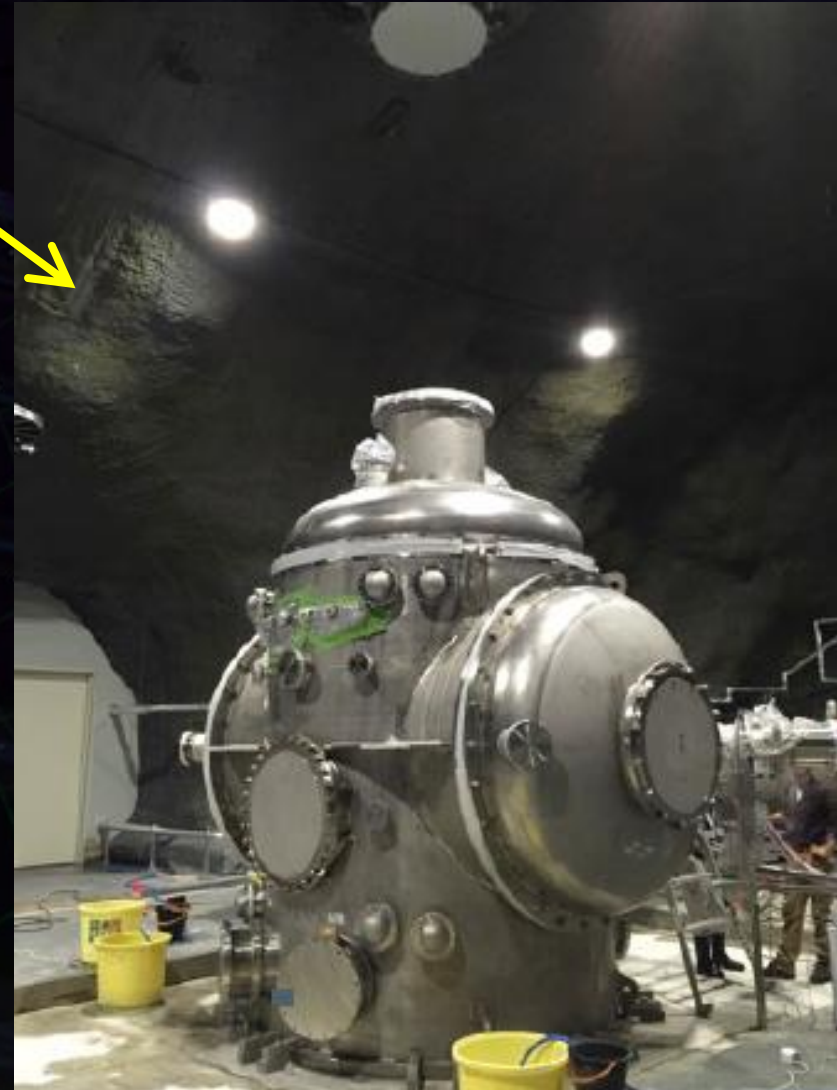
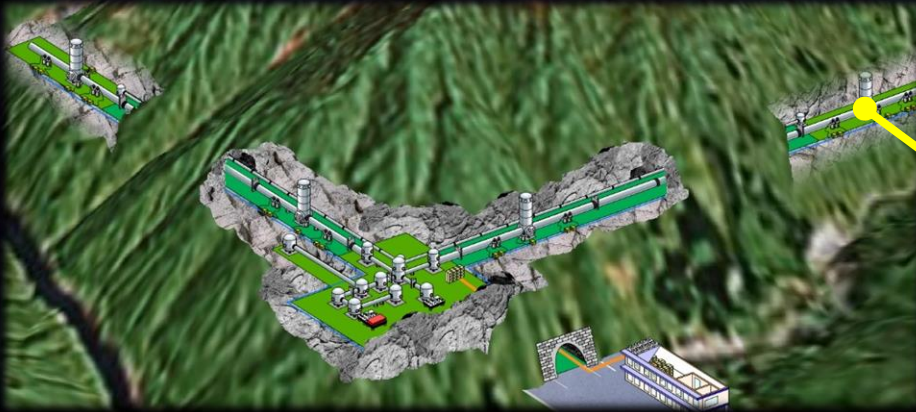
工場での組み立て・試験 (2012年秋).



Inside the Rad. Shield



クライオスタット



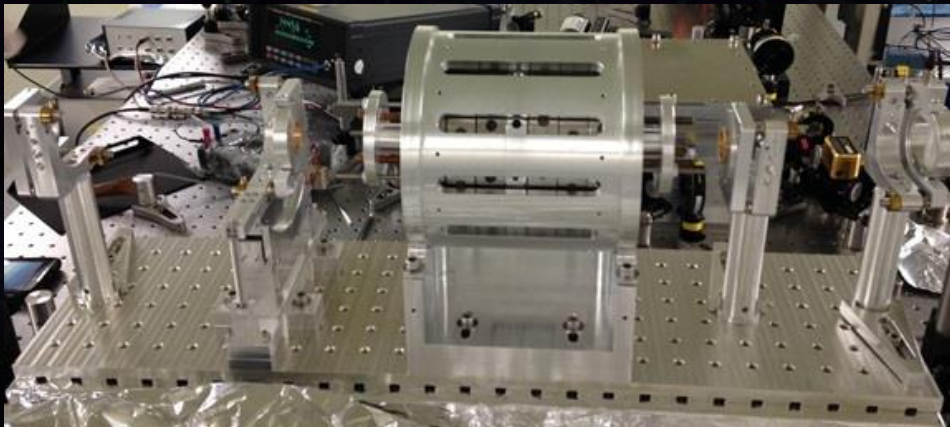
From presentation file by T.Uchiyama (Feb. 2015)

入射光学系

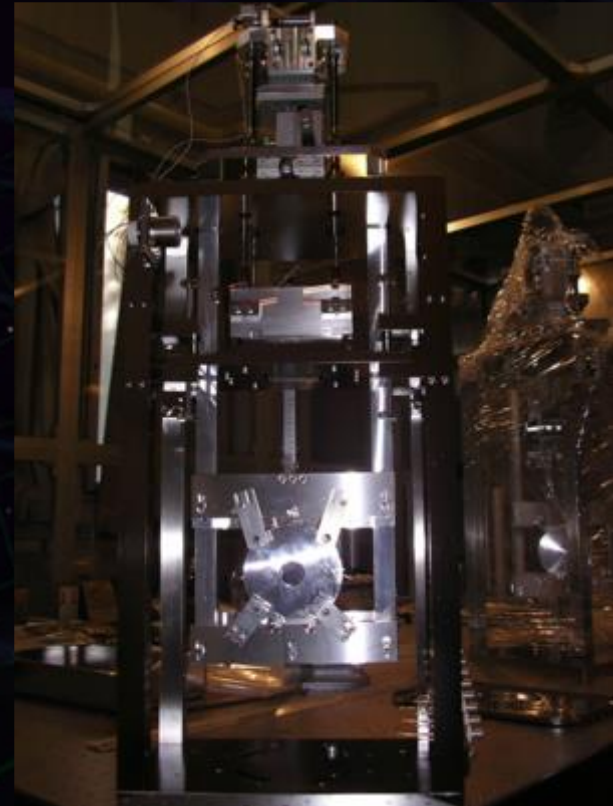


From presentation file by T. Uchiyama + K.Yano

入射光学系コンポーネント



ファラデーアイソレータ

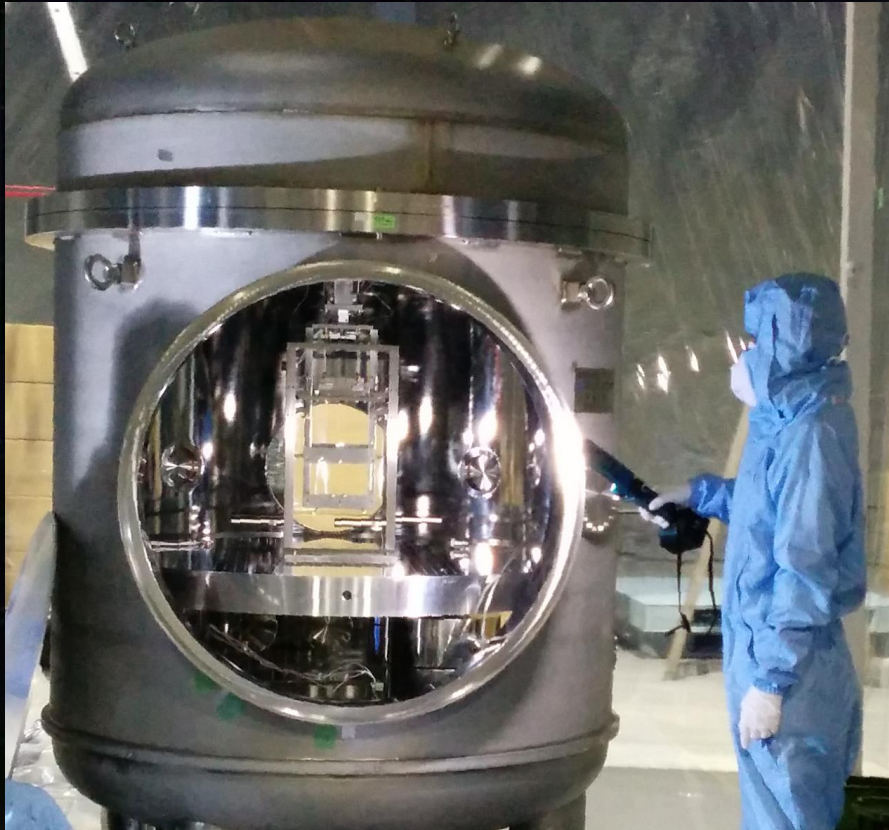


MCサスペンション

From presentation file by T. Uchiyama

防振装置インストール

MCE (モードクリーナーエンド) 防振装置・サスペンション



From presentation file by T. Uchiyama

スタック防振装置部品

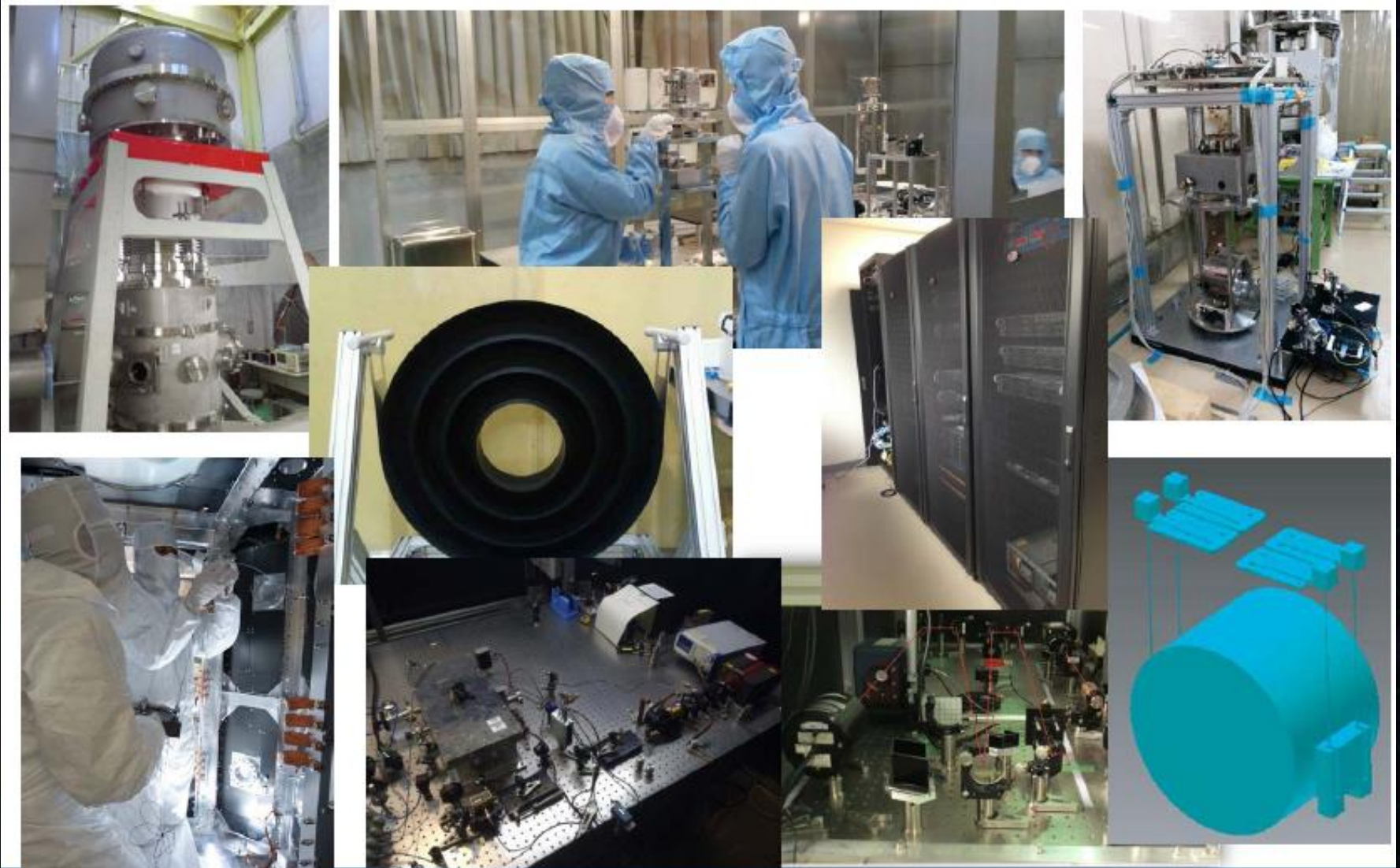


防振装置外枠 (Type-B Outer Frame)



From presentation file by T. Uchiyama

Off-Siteでの開発



From presentation file by T. Kajita

まとめ

KAGRA : プロジェクト進行中

- 観測可能距離 $\sim 200\text{Mpc}$
 - 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.
位置決定精度 ~ 10 平方度, $< 4\text{min}$ でのアラート.
 - 銀河カタログの利用, 解析手法の工夫など改善余地.
- トンネル掘削完了 坑内外の施設完成しつつある.
- 真空ダクト搬入, 真空槽・クライオスタット設置
- 入射光学系・防振系インストール進行中.
- 2015年初期運転, 2017年頃 本格観測開始.

終わり