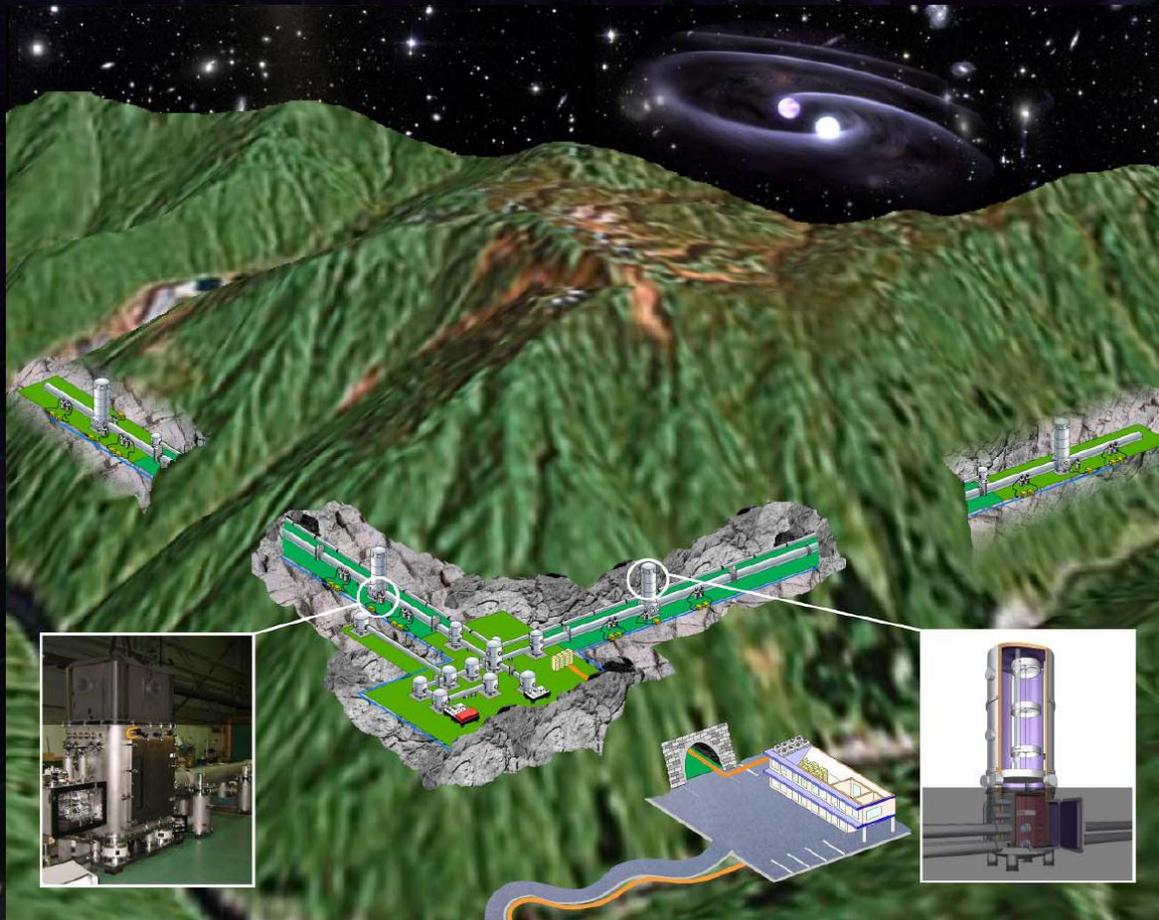


重力波望遠鏡 かぐら(KAGRA) が拓く新しい天文学



安東 正樹
(重力波プロジェクト推進室)

On behalf of
the KAGRA Collaboration

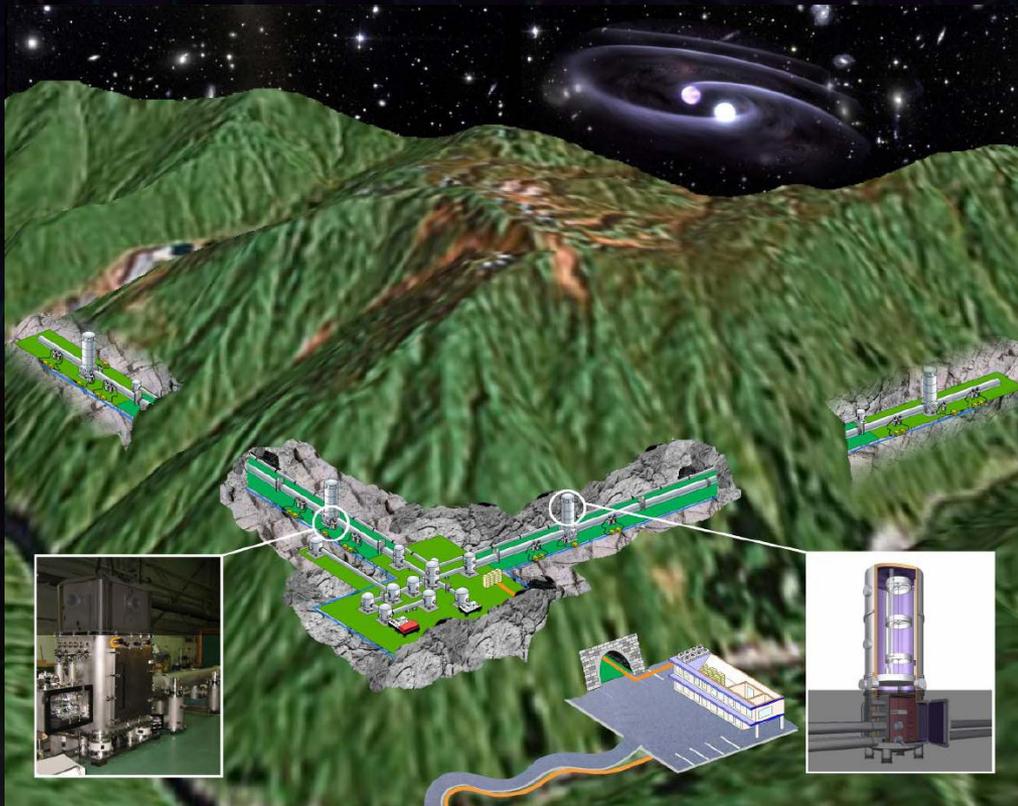
大型低温重力波望遠鏡

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

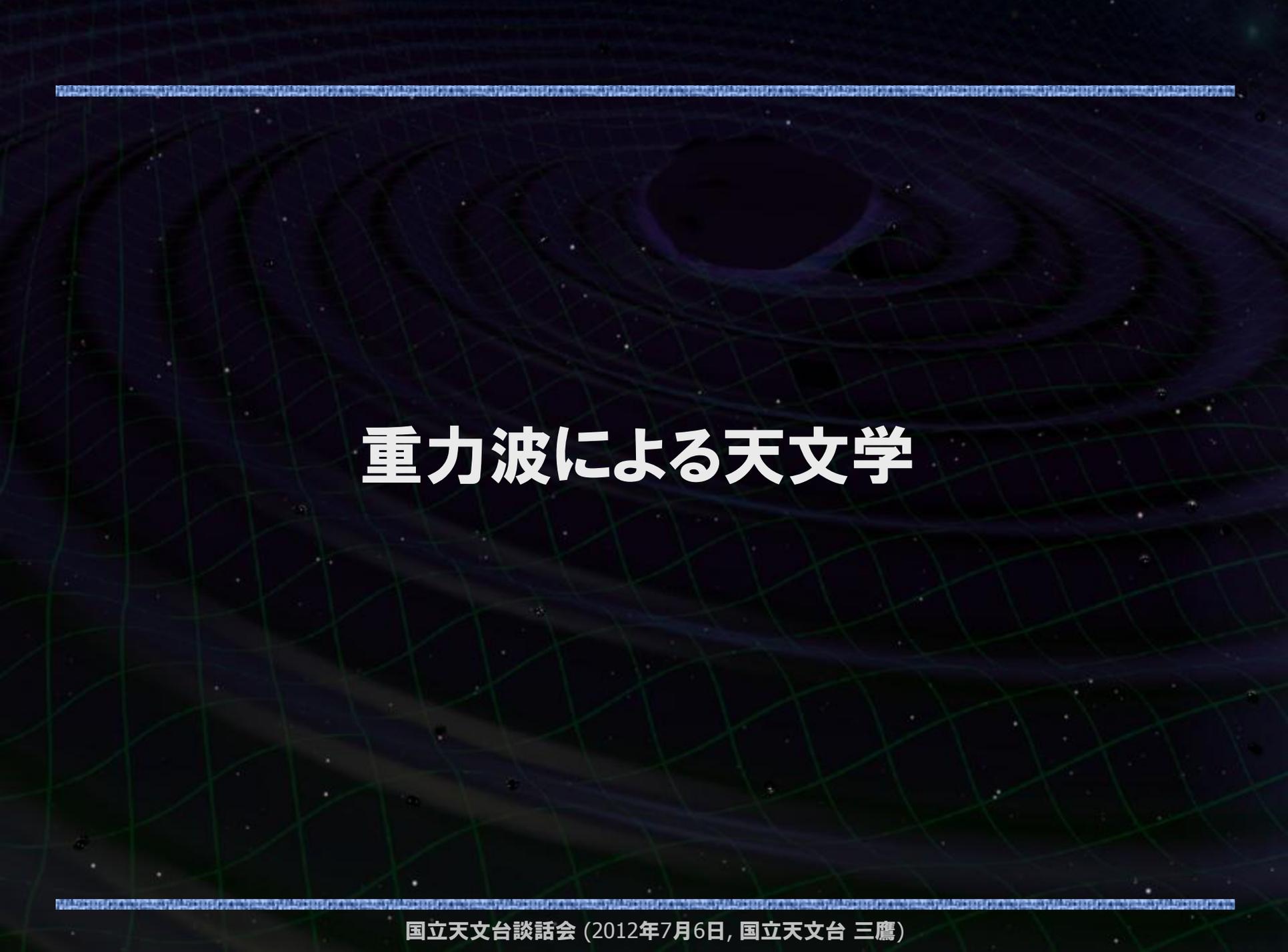
- Baseline length: 3km
- High-power Interferometer

低温干渉計

- Mirror temperature: 20K

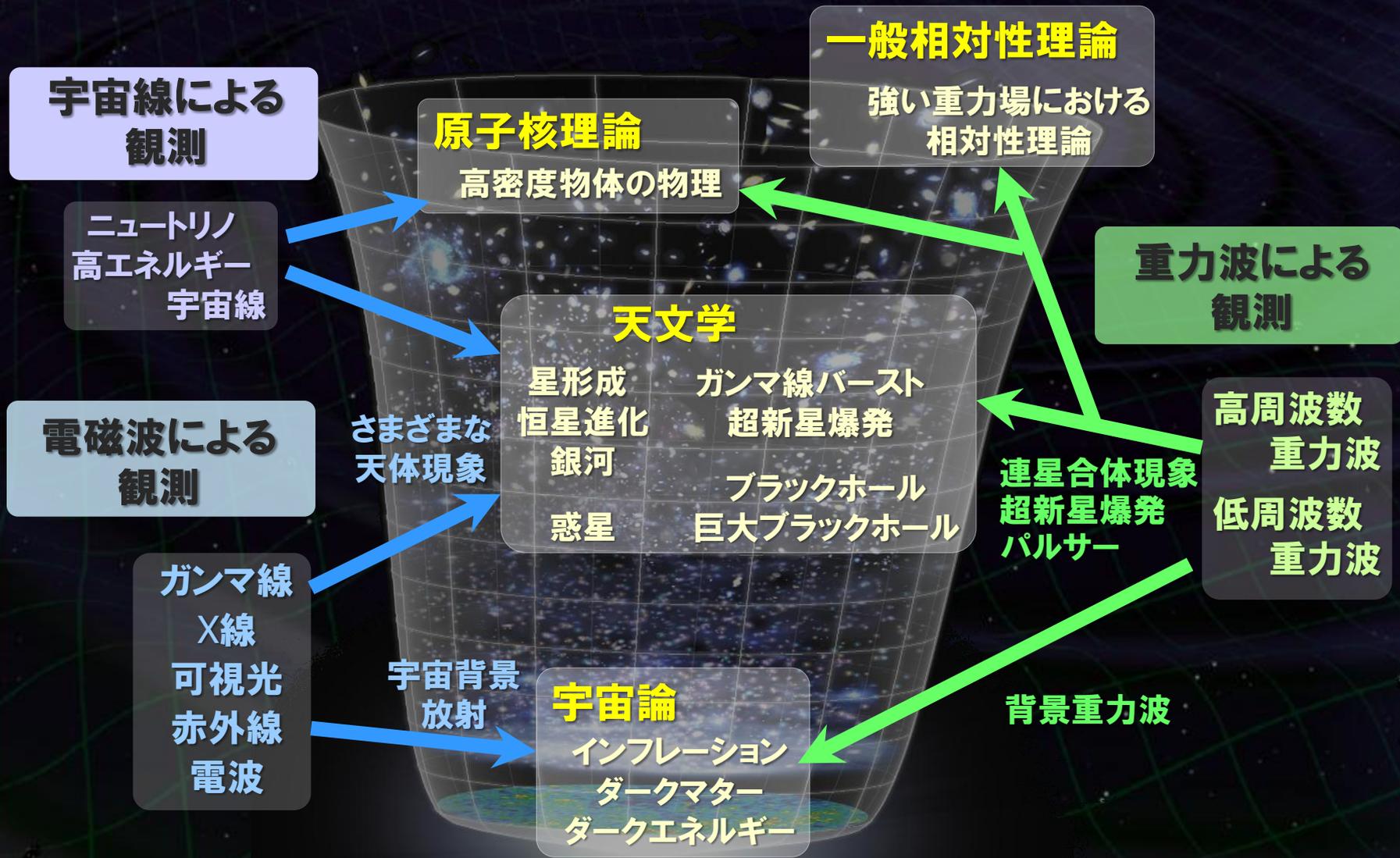
地下の安定・静寂な環境

- Kamioka mine,
1000m underground



重力波による天文学

重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

電磁波

J.C. Maxwell



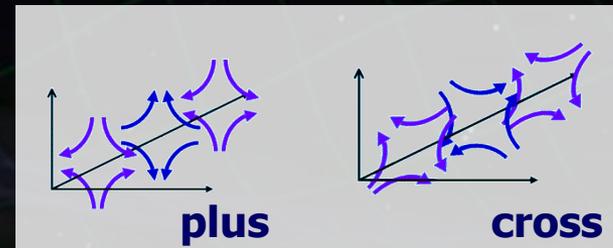
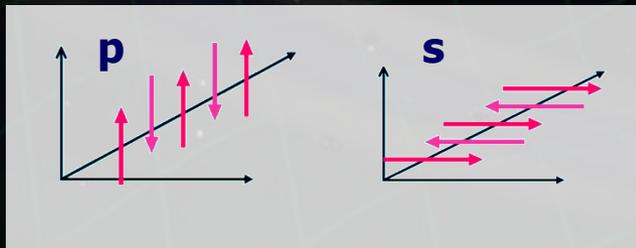
- 光速で伝播する電磁場の変動
- **電磁気学** :
マクスウェル方程式の波動解
- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱
- 波源 > 波長 → 画像情報
- 双極子放射, 2つの偏波

重力波

A. Einstein



- 光速で伝播する時空の歪み
- **一般相対性理論** :
アインシュタイン方程式の波動解
- **質量**の加速度運動により生成
- 物質に対して **強い透過力**
- 波源 < 波長 → **バルクな情報**
- **四重極放射**, 2つの偏波



From presentation
by Laura Cadonati

主な重力波源



CG/KAGAYA

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, 高エネルギー天体現象

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

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

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)

Ando+, PRL 86, 3950 (2001)



CLIO (2002~)

基線長100mの

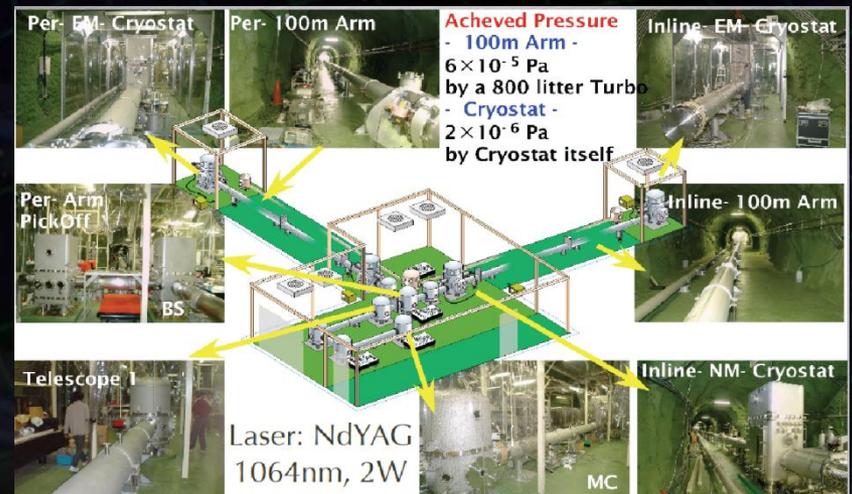
低温・地下レーザー干渉計

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

Uchiyama+, PRL 108, 141101 (2012)



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 ~ 10 event/year

第2世代 重力波望遠鏡

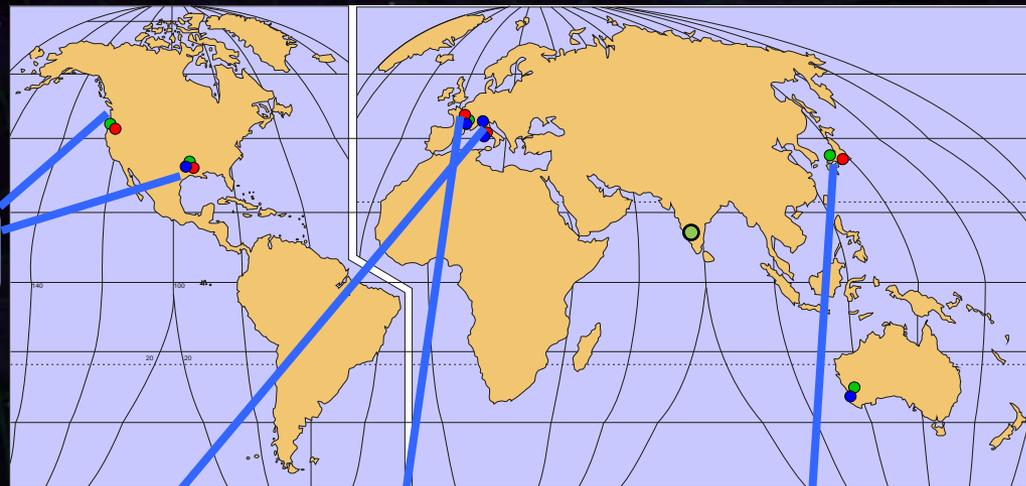
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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)



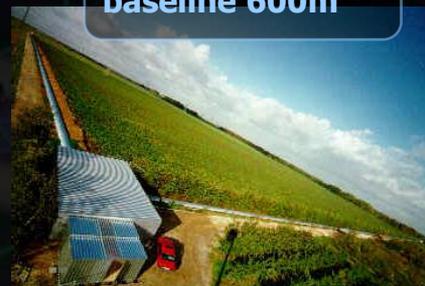
LIGO-Australia
in proposal



LIGO-India
in proposal



Adv. VIRGO (ITA-FRA)
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)
baseline 600m



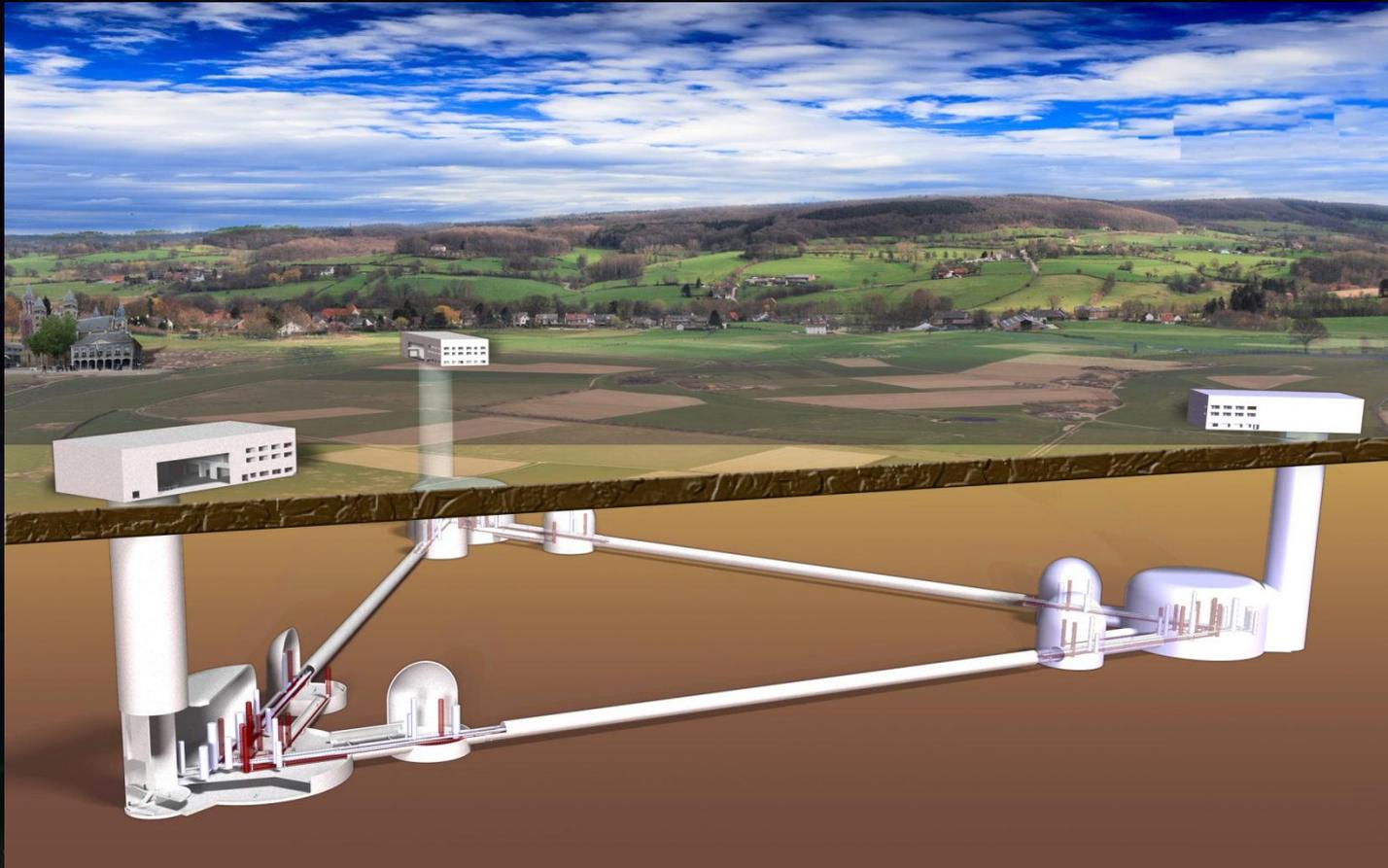
KAGRA (JPN)
baseline 3km



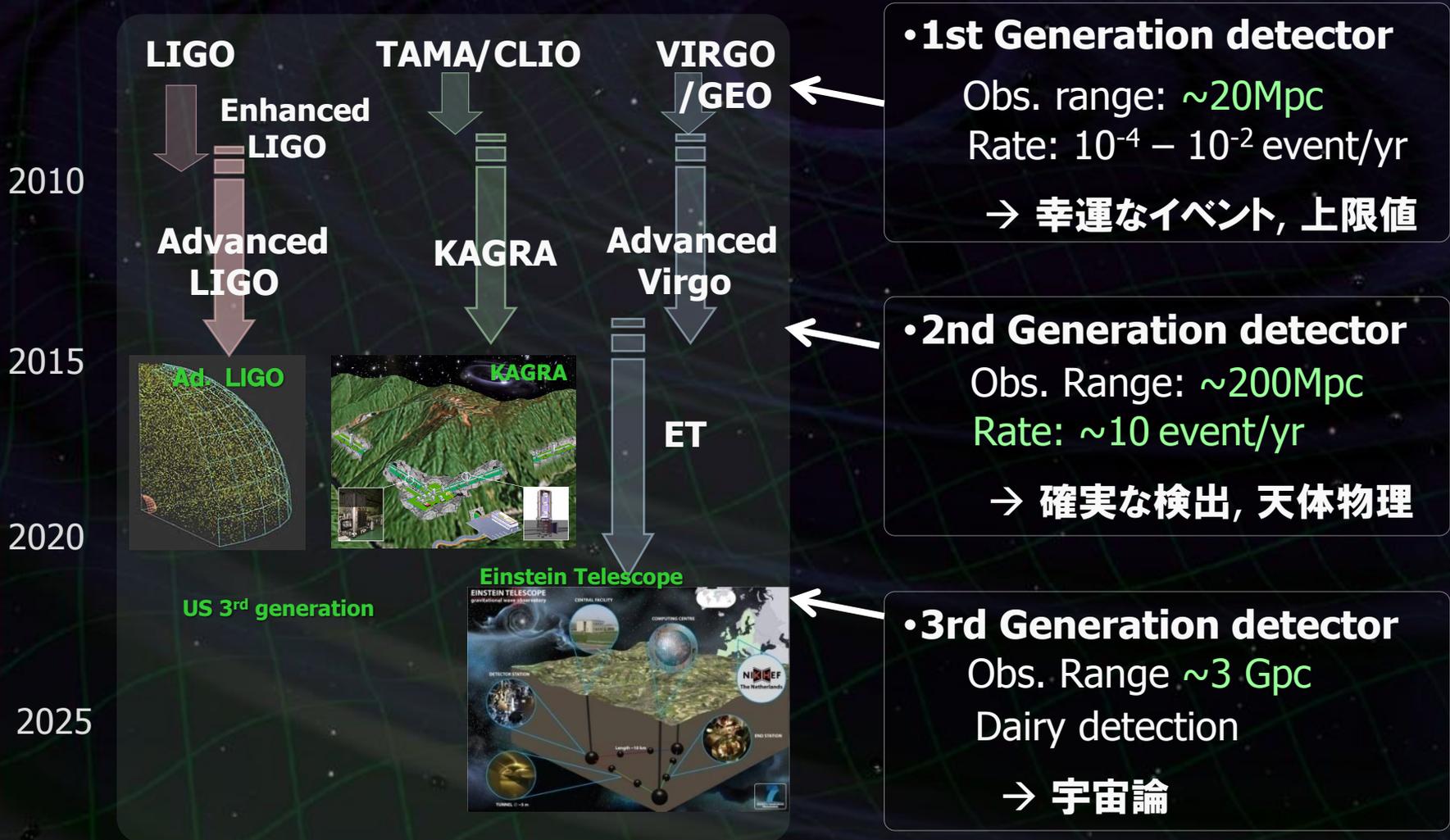
第3世代 重力波望遠鏡

3rd-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



KAGRAの概要

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

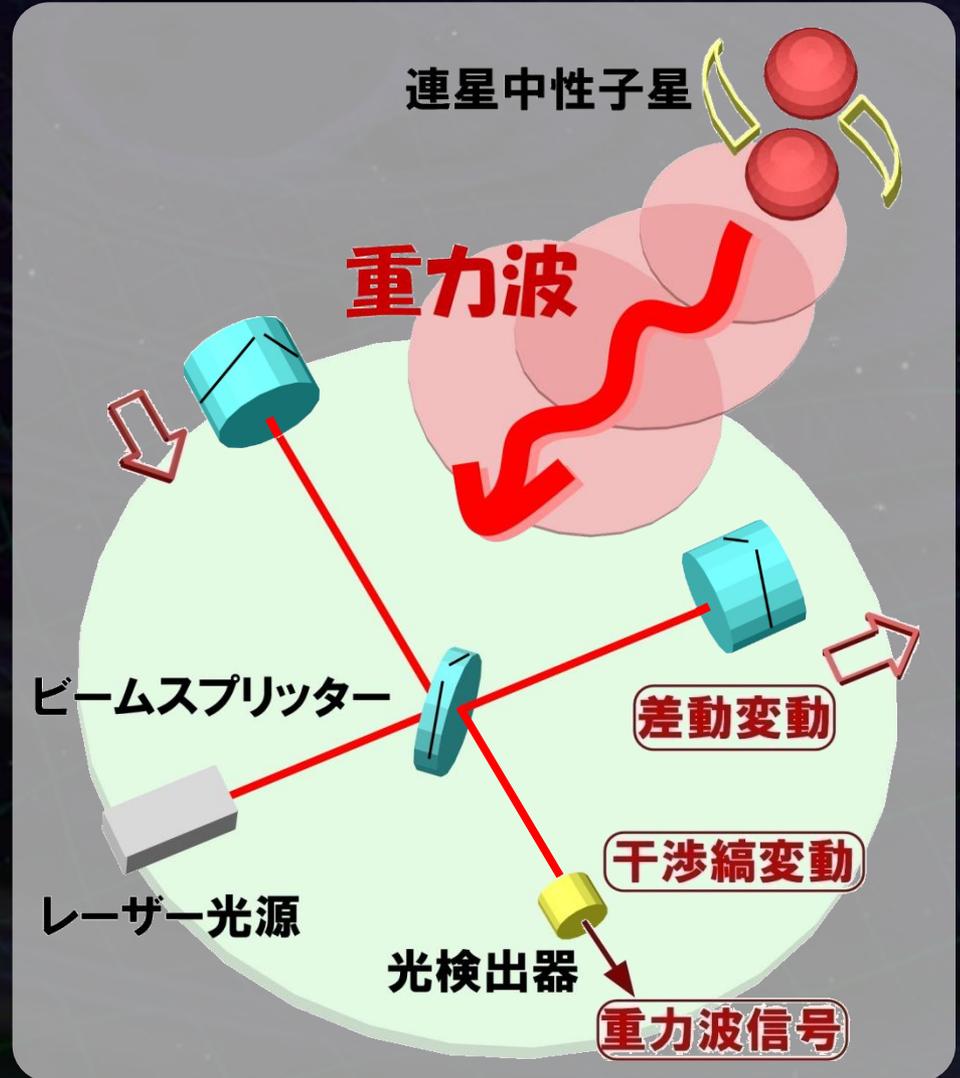


それぞれ、懸架された鏡で打ち返し
干渉させる → 光検出器で観測.

重力波が入射



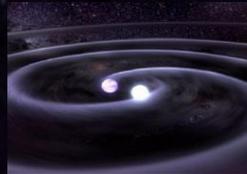
腕の長さの差動変動を
干渉光量の変動として検出



重力波望遠鏡の高感度化

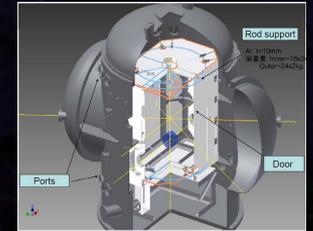
• 重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



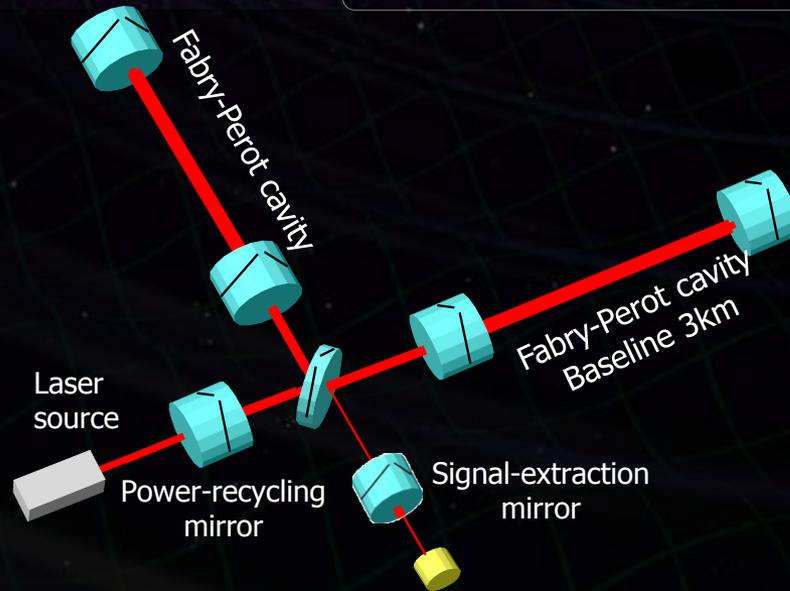
• 鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



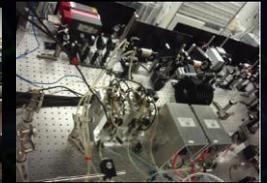
• 地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



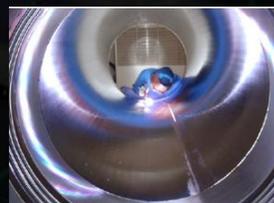
• 光の量子雑音

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

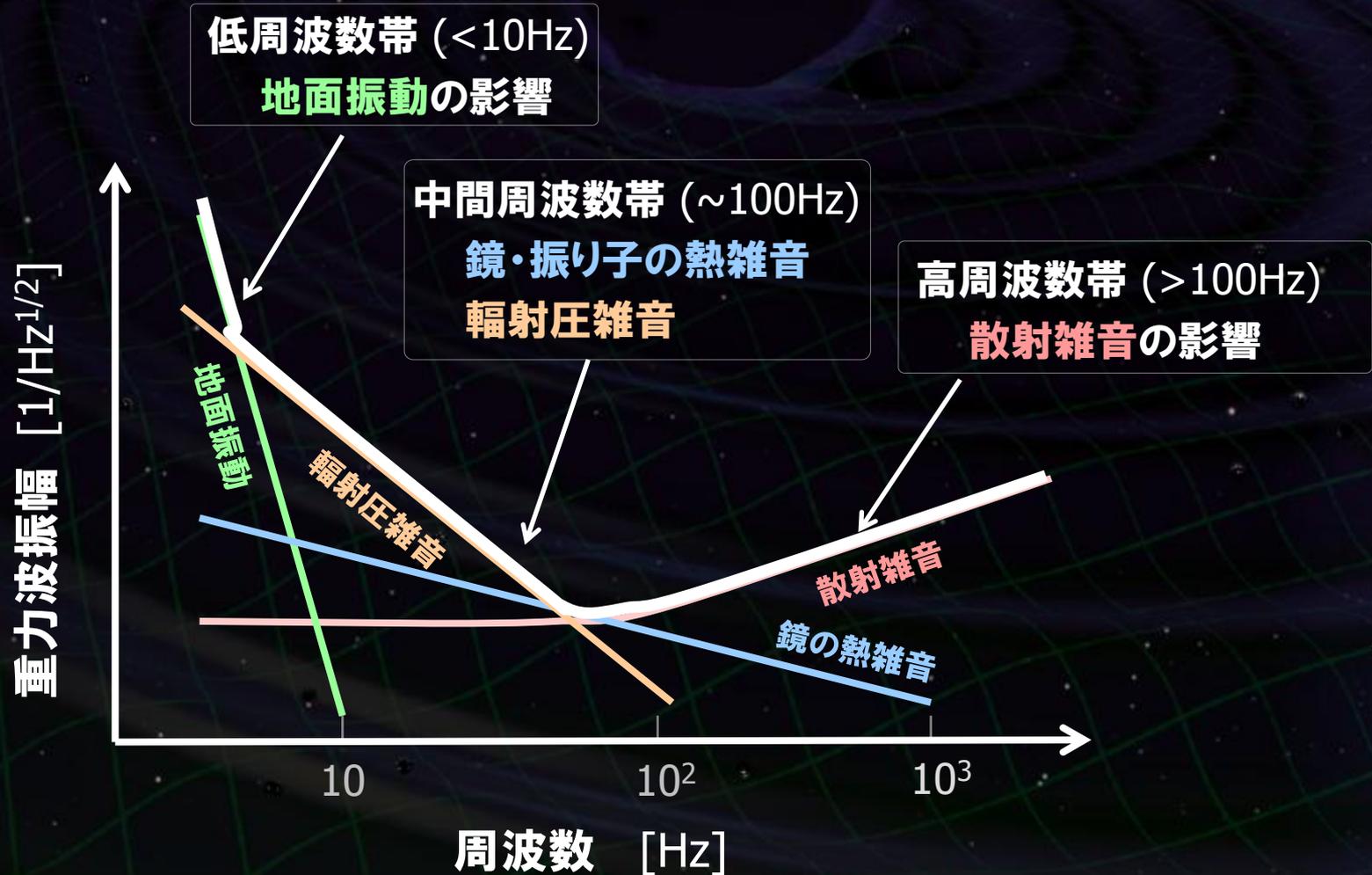


• 長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系
環境モニタ, データ保管・分配



重力波検出器の感度

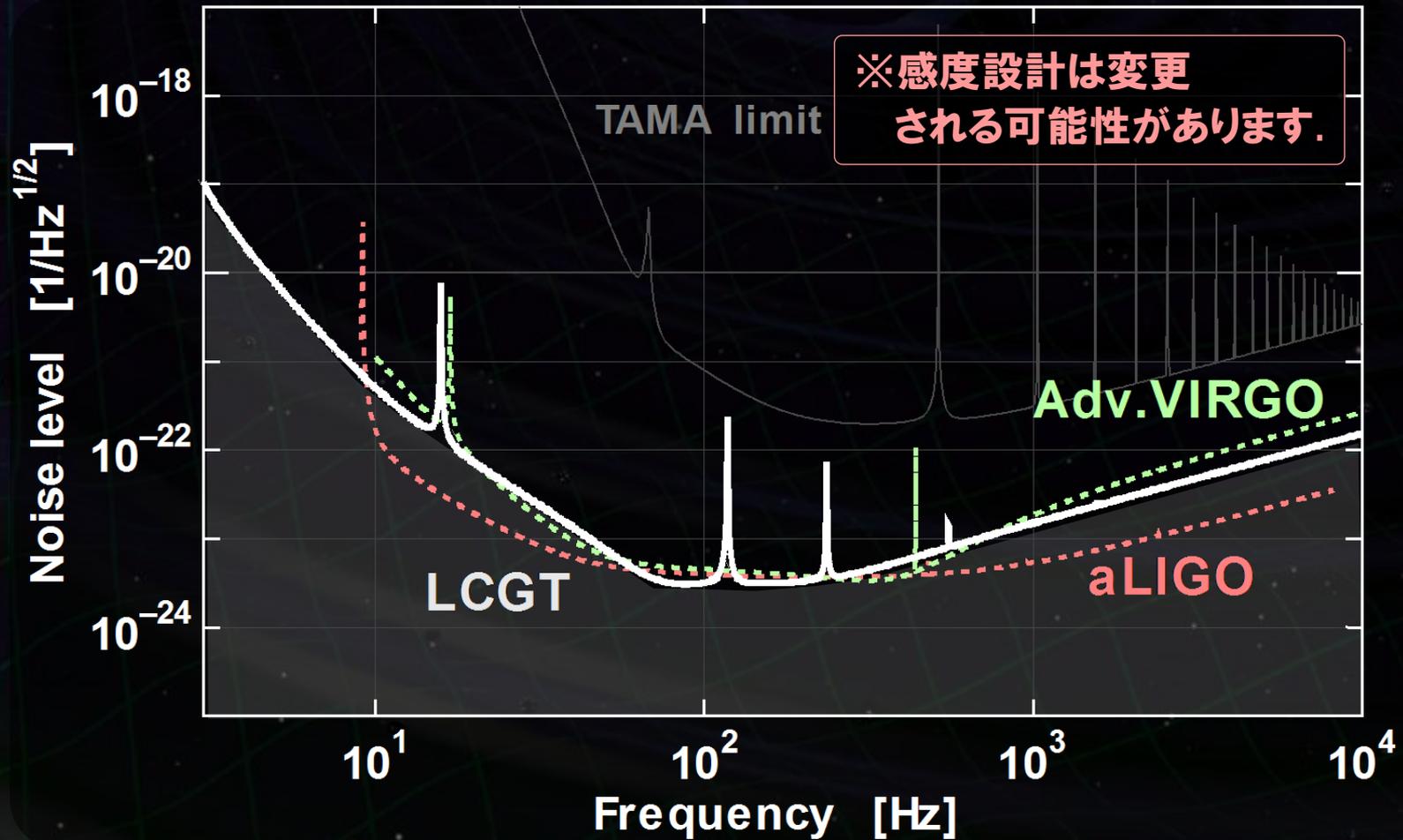


KAGRAの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度
aLIGO や Ad.VIRGOと同等

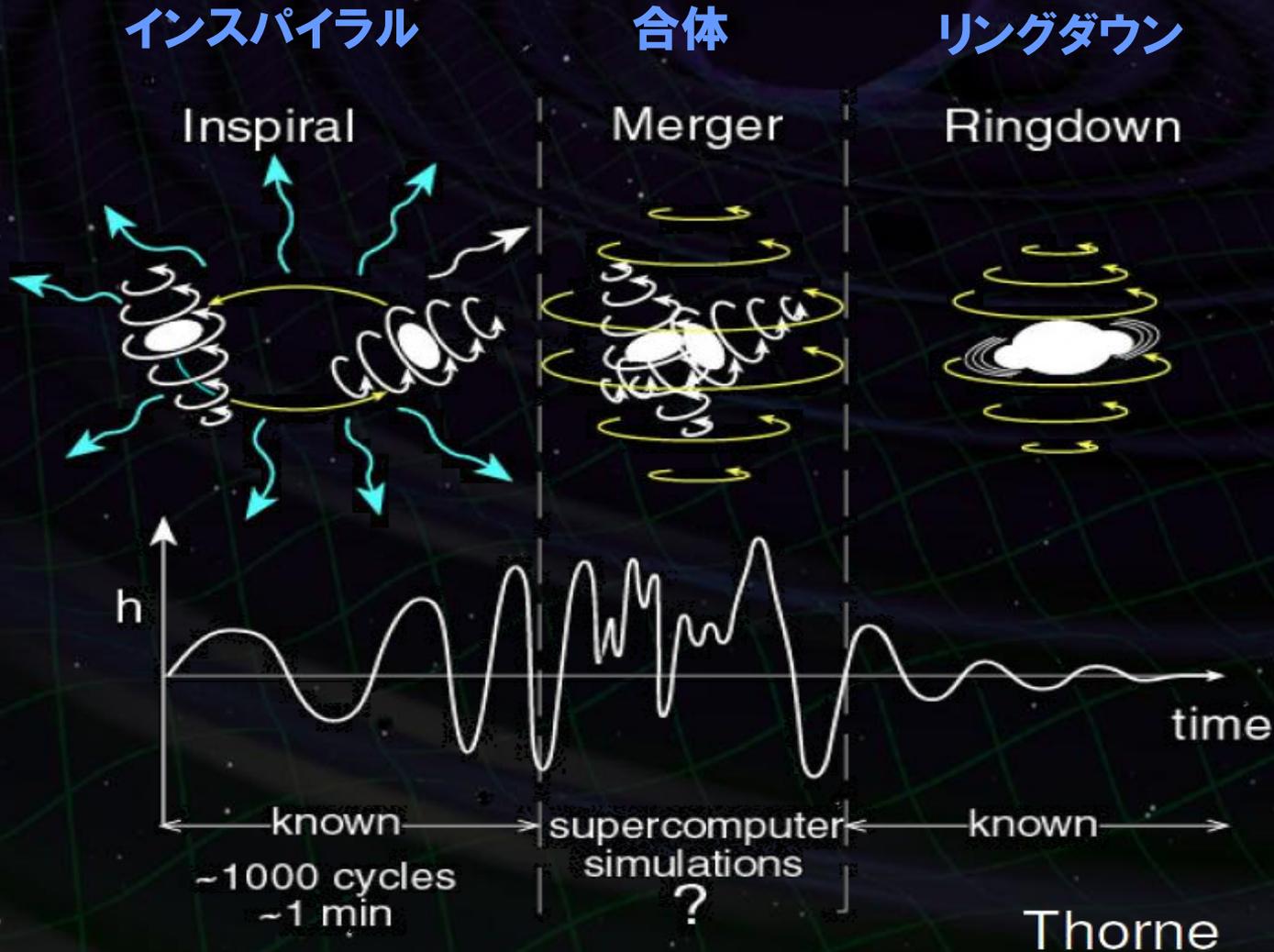


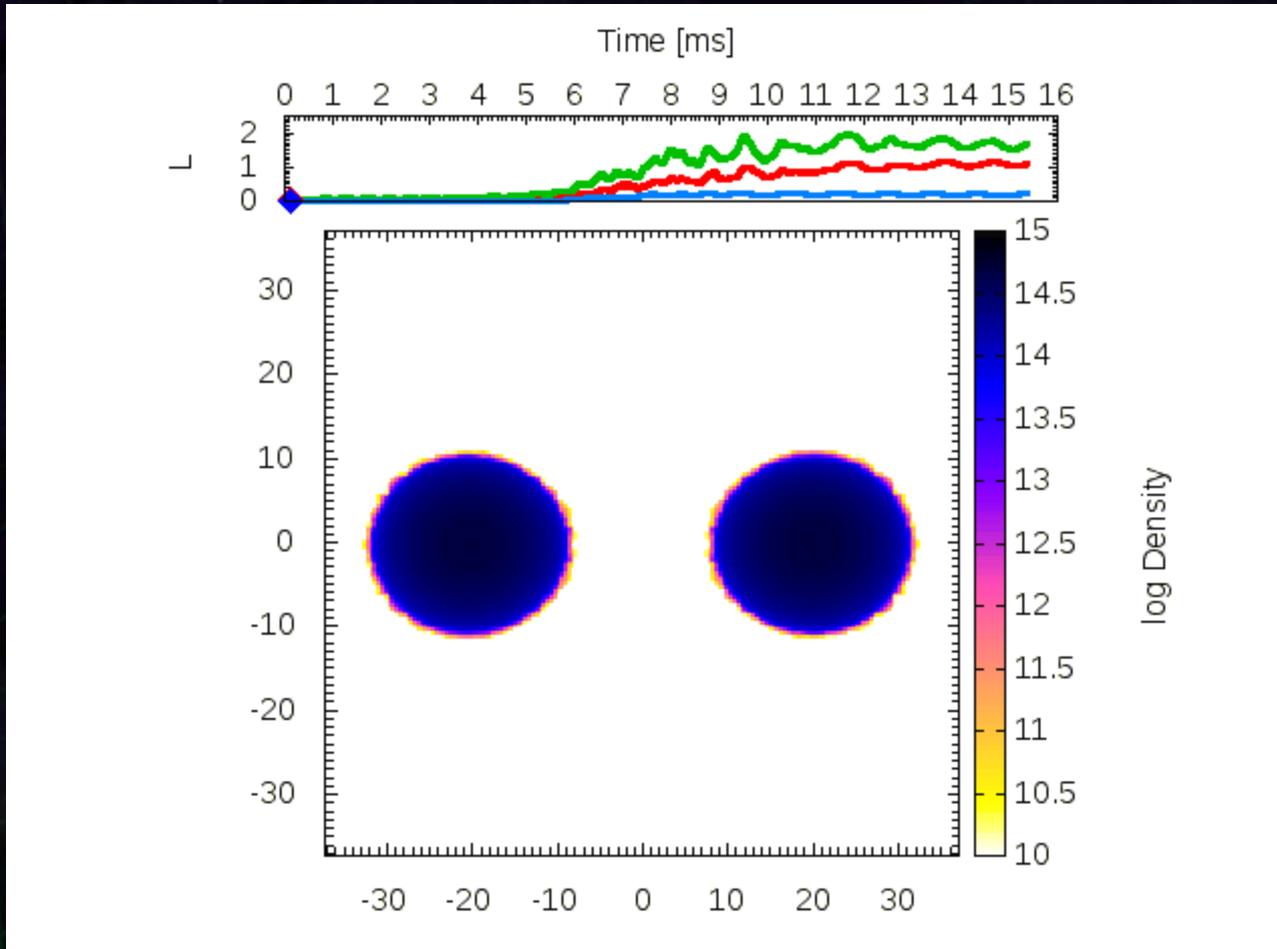
国際観測網を形成
年間1回以上の重力波信号検出



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





連星中性子星の合体数値シミュレーション by 関口氏

「耳をすます」



重力波の音 by 神田氏

連星合体観測による知見

• 重力波の初検出

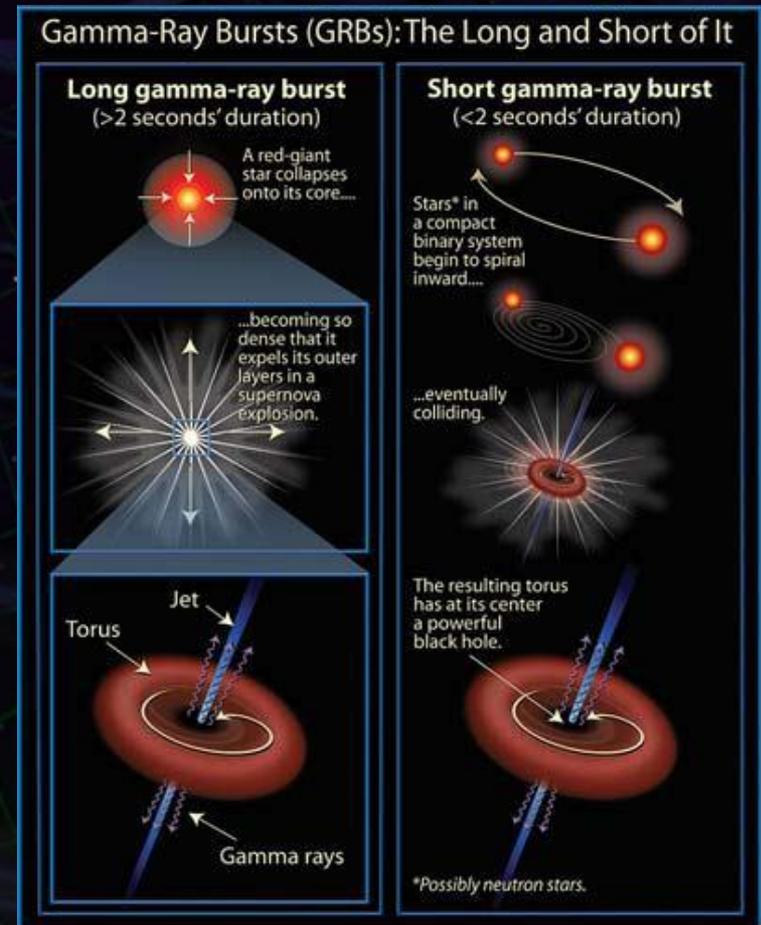
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生，
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

• 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

中性子星連星合体の数値シミュレーション

Hotokezaka+, PRD (2011)

等質量連星
中性子星合体

遠心力によって
 $M > M_{\max}$
を支える中性子星

HMNS形成

Type I

BHへ崩壊

Type II
寿命 < 5ms

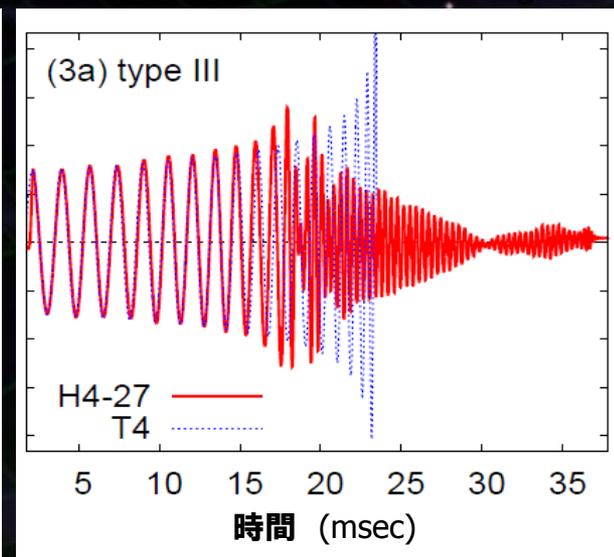
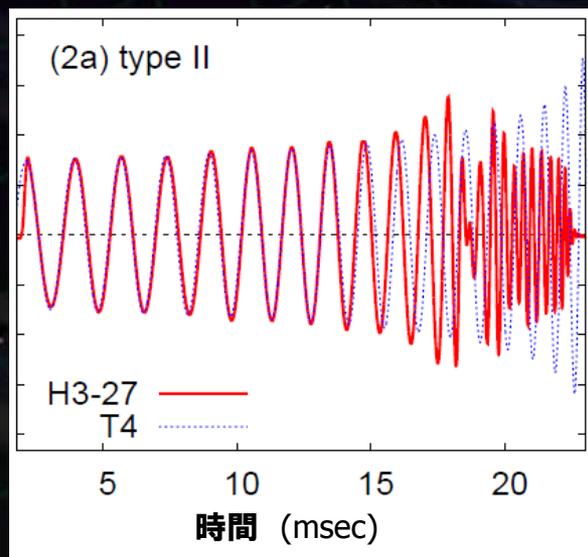
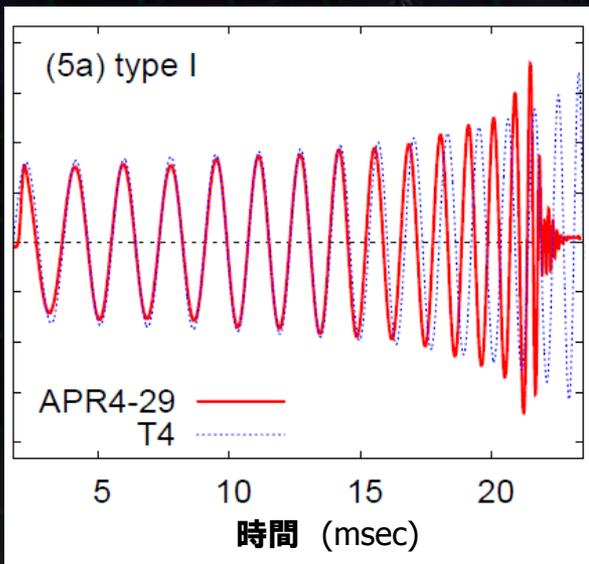
Short lived

BHへ崩壊

Type III
寿命 > 5ms

Long lived

BHへ崩壊



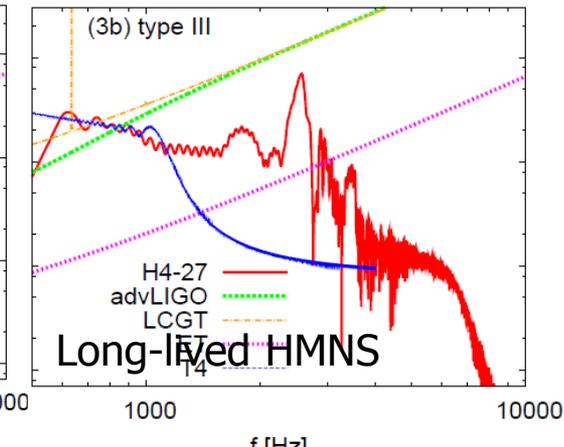
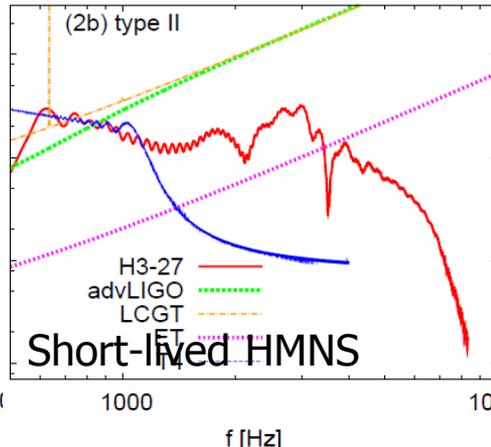
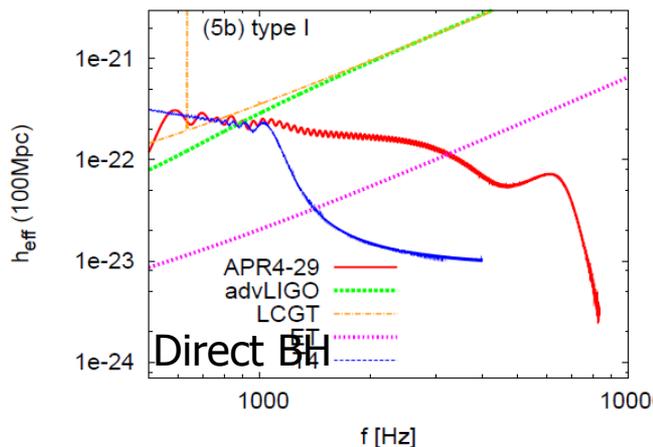
連星合体のスペクトル

距離100Mpc

APR4, Type I
1.45-1.45Msun

H3, Type II
1.35-1.35Msun

H4, Type III
1.35-1.35Msun



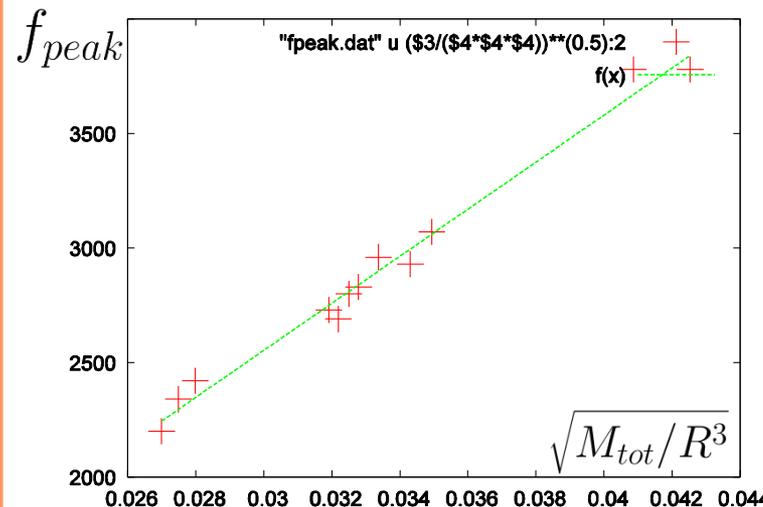
HMNSの回転周波数にピーク
→ 中性子星の半径と相関



EOSに強い制限

Hotokezaka+, PRD (2011)

Kyutoku+, PRD (2010), Bauswein+ (2011)



状態方程式と天文学

中性子星の状態方程式

(密度 $2 \sim 15\rho_0$)

密度-圧力

中性子星の半径-質量

原子核理論

→ 地上実験が困難な
高密度物質の物理
(ハイペロンなど)

理研Web pageより

高エネルギー天体现象

→ 天文学, 極限状態の物理法則

電波パルサー

超新星爆発

連星合体

長ガンマ線バースト

短ガンマ線バースト

軟ガンマ線リピーター

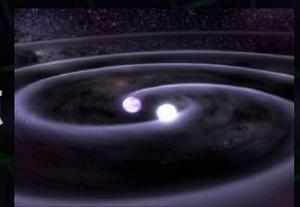
LMXB

マグネター

ブラックホール形成

相対論・宇宙論

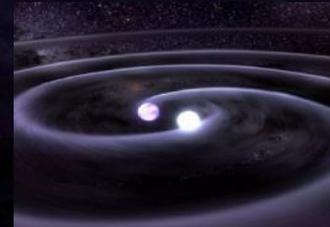
連星合体 → 標準音源
(Standard Siren)



強い重力場での重力法則
宇宙の加速膨張観測

Messenger and Read, arXiv:1107.5725

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 (目安)

(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)

最初の観測を目指した競争 + 国際協力

(Ad. LIGO, Ad. VIRGOとの同時観測)

天文的な意義

天球のカバー ← 干渉計は弱い指向性を持つ

検出された場合 --- 天文的情報の取得

波源の位置, 偏波 の情報の取得

→ 最低3台, 指向性を考慮するとさらに必要

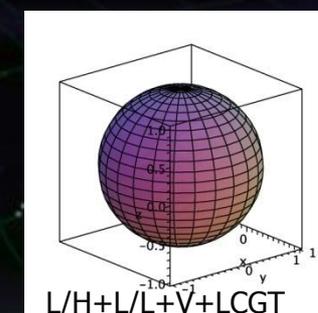
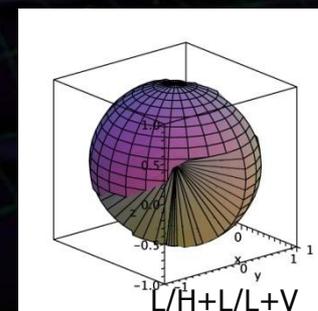
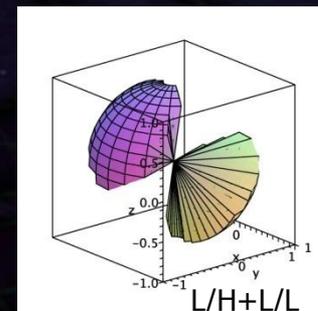
実際上の意義

重力波信号は微弱

→ 多くの Fake event が現れる

複数台での同時検出

→ 検出の信頼度の向上, 偽イベントの除去



干渉計の指向性

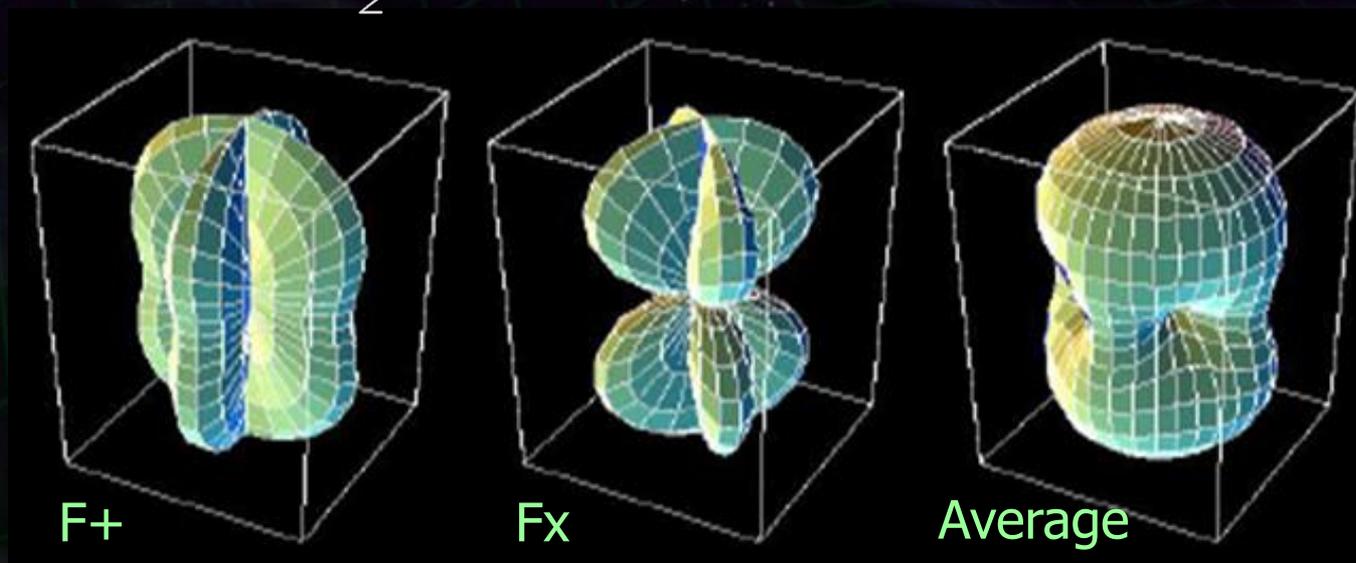
- 干渉計型重力波検出器: 指向性・偏波依存性がある。

$$h_{\text{obs}}(t) = F_{+} \cdot h_{+}(t) + F_{\times} \cdot h_{\times}(t)$$

干渉計のアンテナパターン

$$F_{+} = -\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \cos 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \sin 2\psi$$

$$F_{\times} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \sin 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \cos 2\psi$$

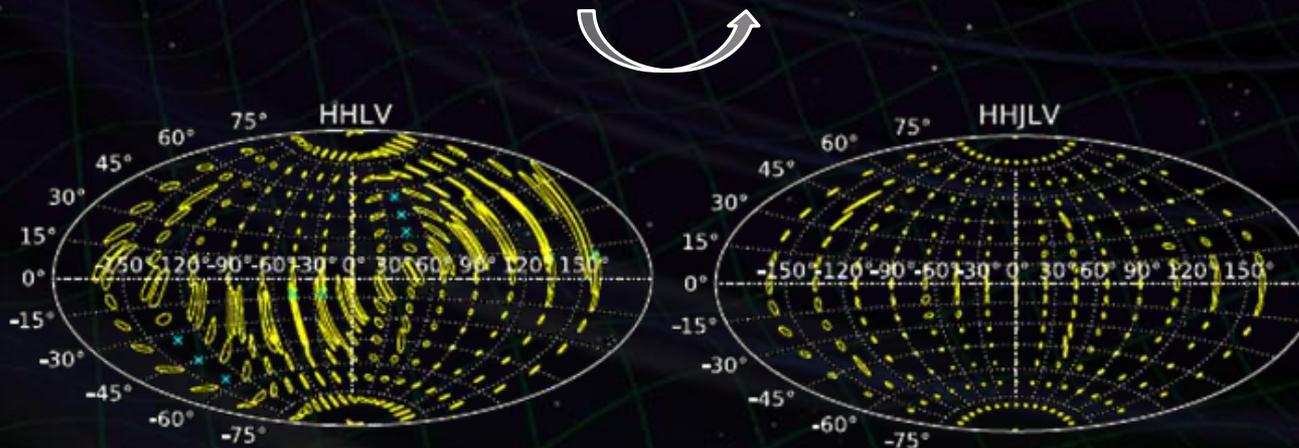


天球上の角度分解能

By H. Tagoshi

	LHV	LHVJ	LHVA	LHVJA
average of $\delta\Omega$ [Deg ²]	34.4	7.26	4.20	2.78
median of $\delta\Omega$ [Deg ²]	10.8	3.54	2.20	1.46

H: LIGO--Hanford
 L: LIGO--Livingston
 V: Virgo, J: KAGRA
 A: LIGO--Australia



S.Fairhurst
 CQG 28(2011) 105021

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

マルチメッセンジャー天文学

須藤先生 2011年度 東京大学物理学専攻修士課程入学ガイダンス資料



•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
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

- KAGRA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.
⇒ KAGRAには、第2.5世代の望遠鏡としての役割もある.

海外望遠鏡との比較

	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。

KAGRAの設計と現状

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

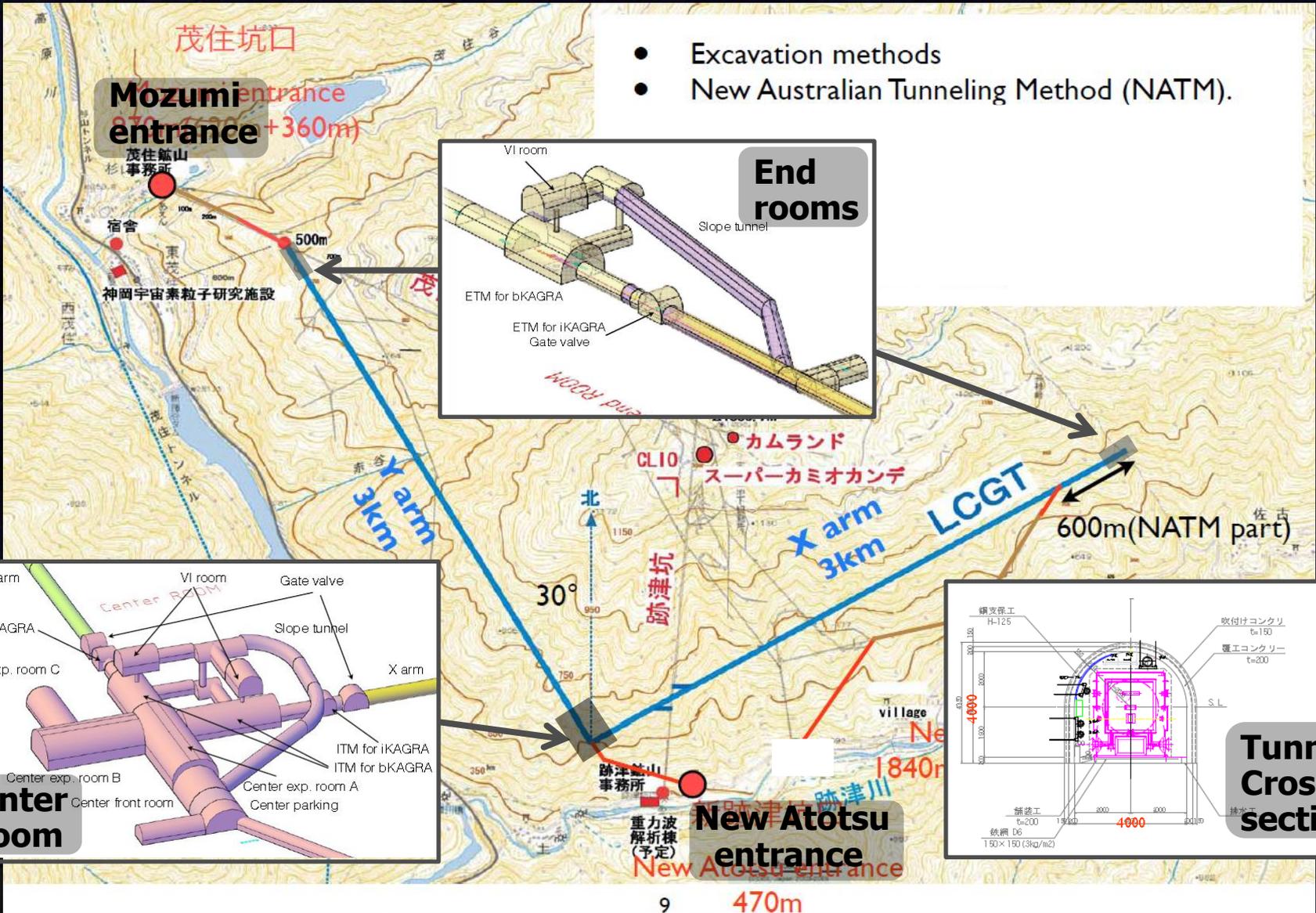
CLIO, **KAGRA**

Geophysics

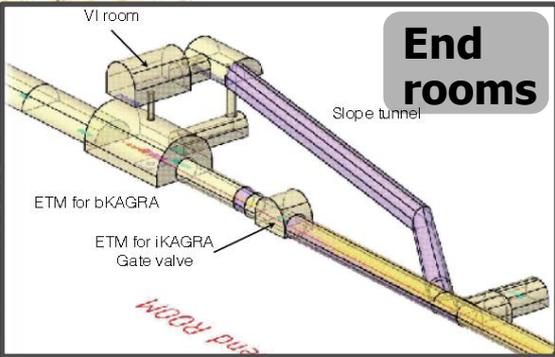
Strain meter

- 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)

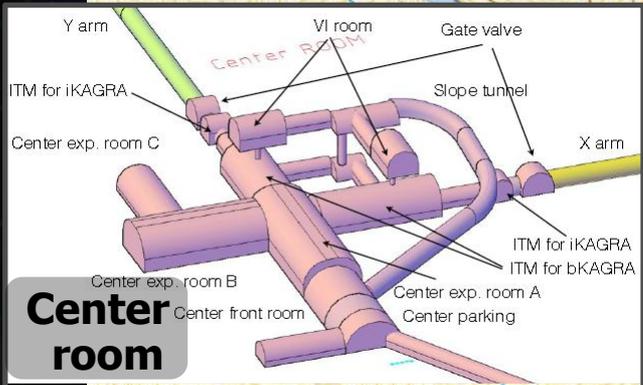
KAGRAトンネル設計



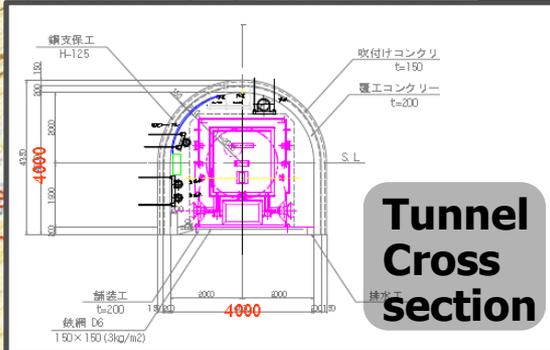
- Excavation methods
- New Australian Tunneling Method (NATM).



End rooms



Center room

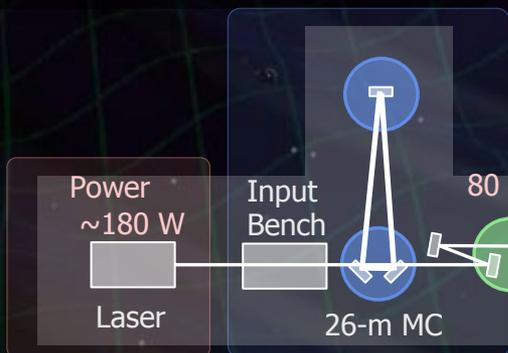


Tunnel Cross section

KAGRA 干涉計構成

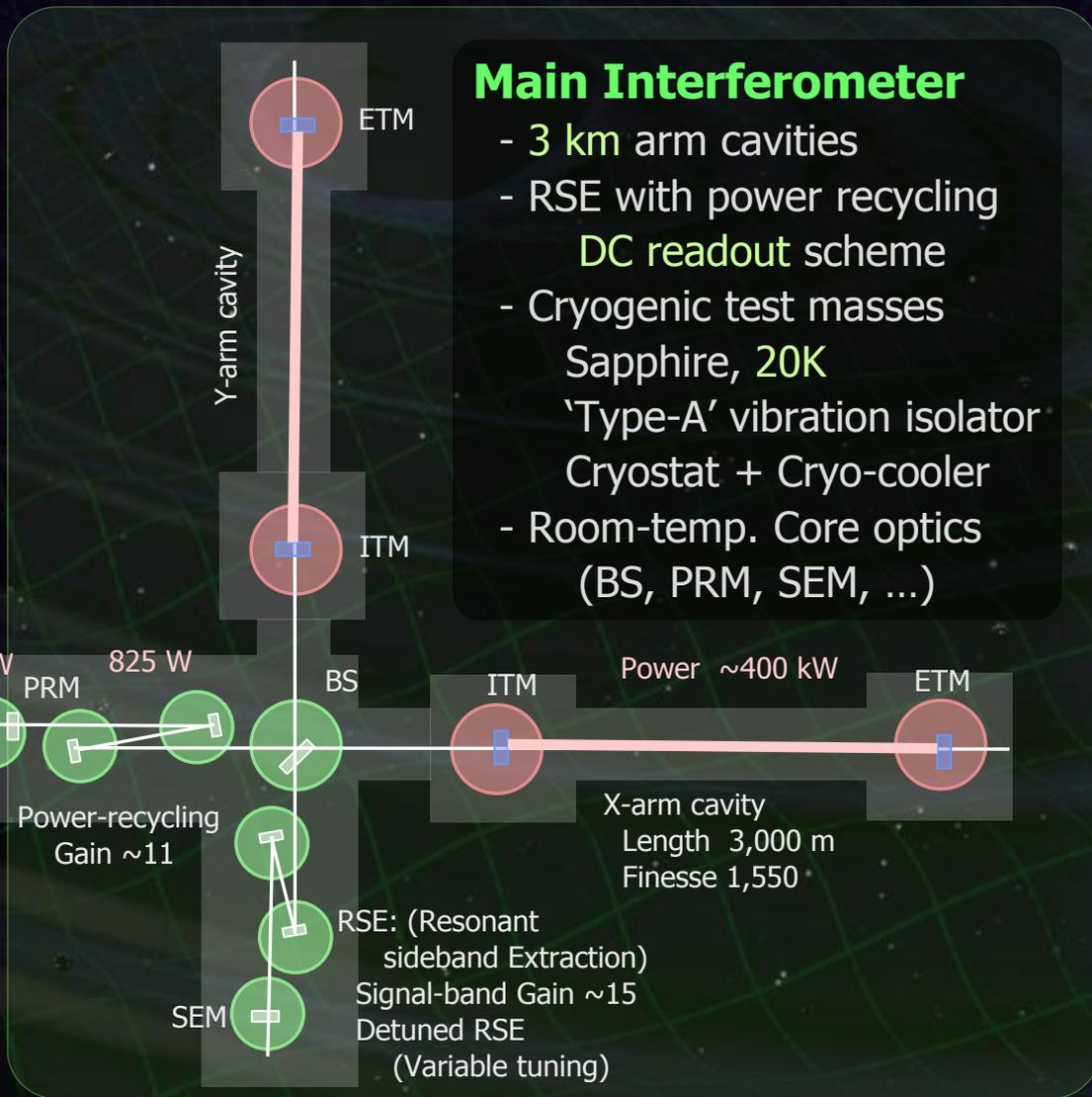
Input/Output Optics

- 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.



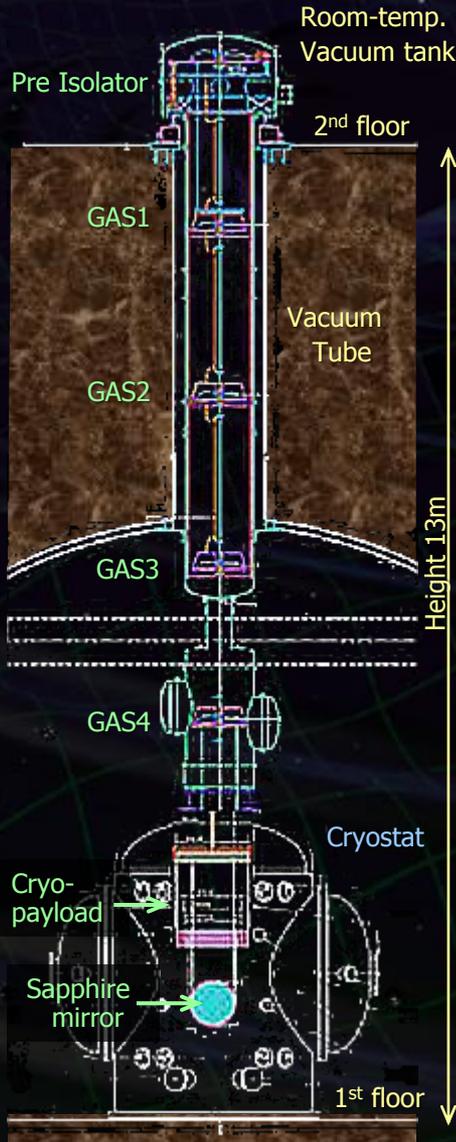
Pre Isolator



GAS filter

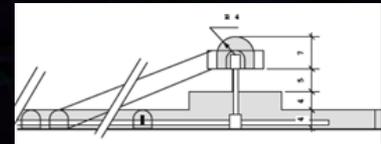
・低温ペイロード

- 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.



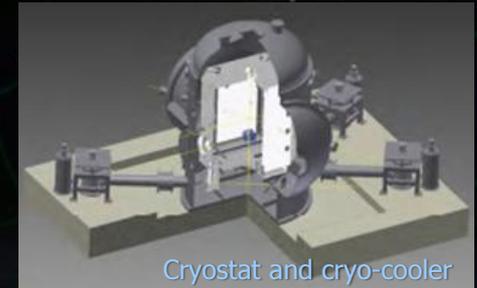
・トンネル : 2層構造

- 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

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)



神岡サイトでの建設工事

茂住口からの
坑道掘削工事 (2012.5)



新跡津口の工事 (2012.4)



Gifu Pre.
Hida-city
Kamioka
Ikenoyama mt.



真空ダクト製作・設置試験

KAGRA模擬トンネル・ビームライン設置試験場 (ミラプロ・野田工場)



June 28, 2012, Photo by Kamiizumi and Iwasaki (ICRR)

真空ダクトの製作・現地納品

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

→ 現在までに約7割が納品済.



Press to form a duct



Bellows for each duct



Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka



Test at MIRAPRO Co. Noda

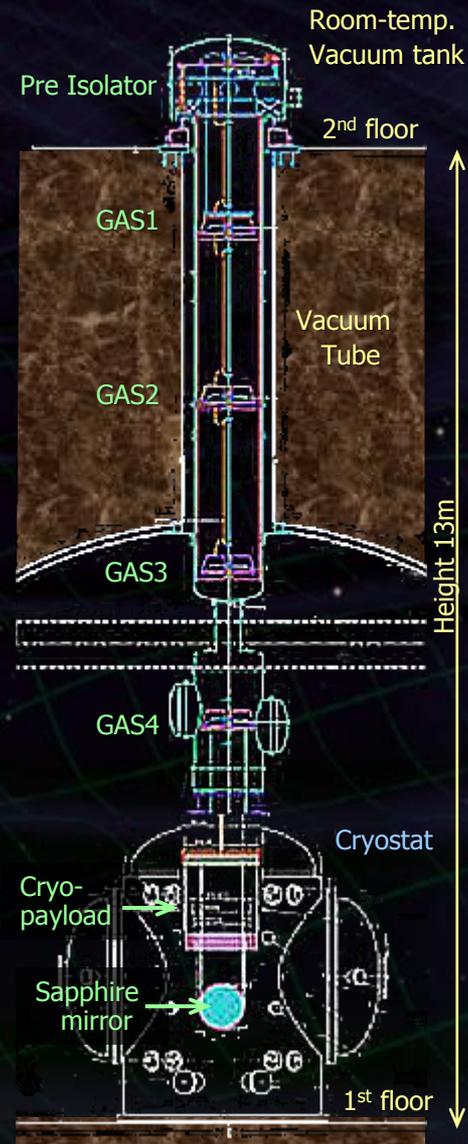
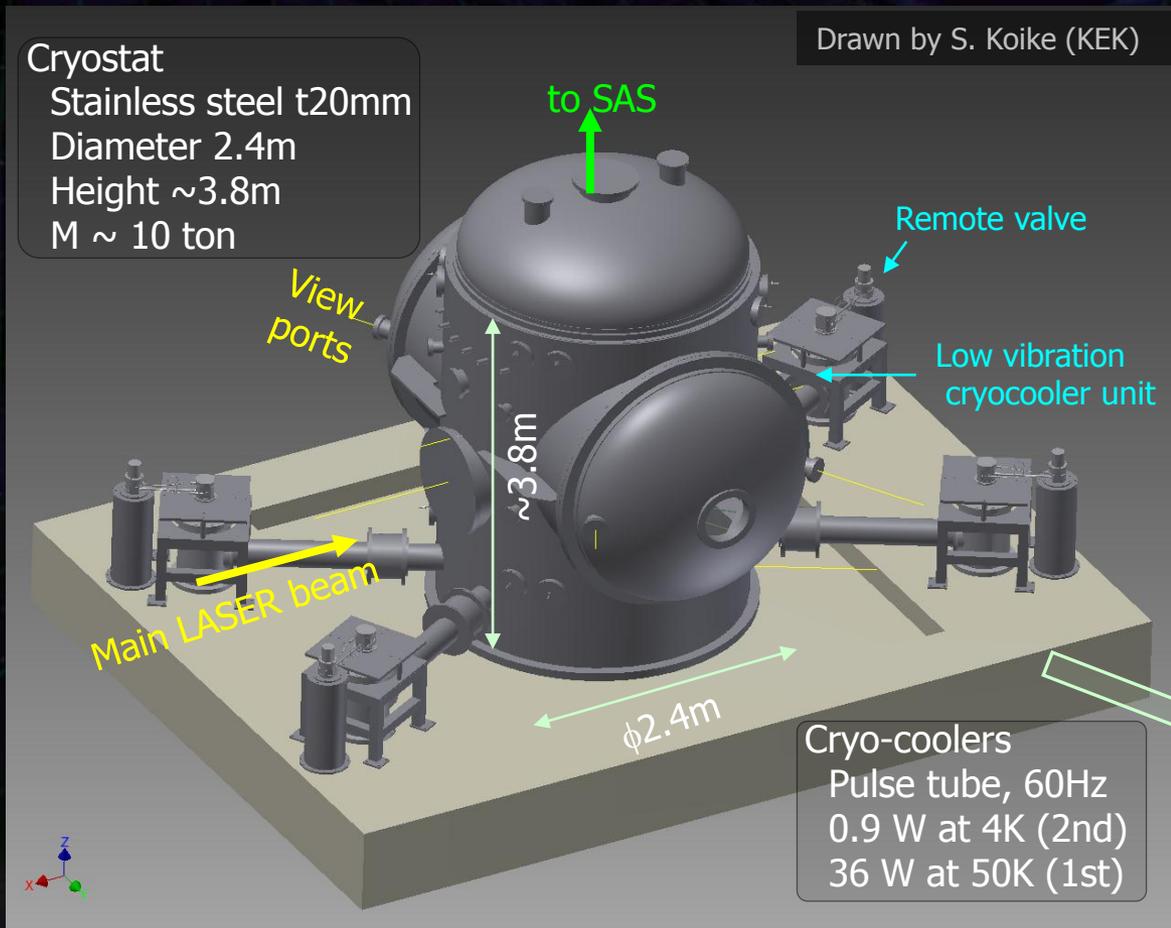


Transportation to Kamioka

Presentation
By Y.Saito (KEK)

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.



クライオスタット製作

Ribs inside cryostat



Welding on the connection port



Pipes



Main body ($\Phi 2.4\text{m}$, H3.8m)

Connection port to cryo-cooler unit



Photos from T.Suzuki's presentation
at External Review (April 2012)

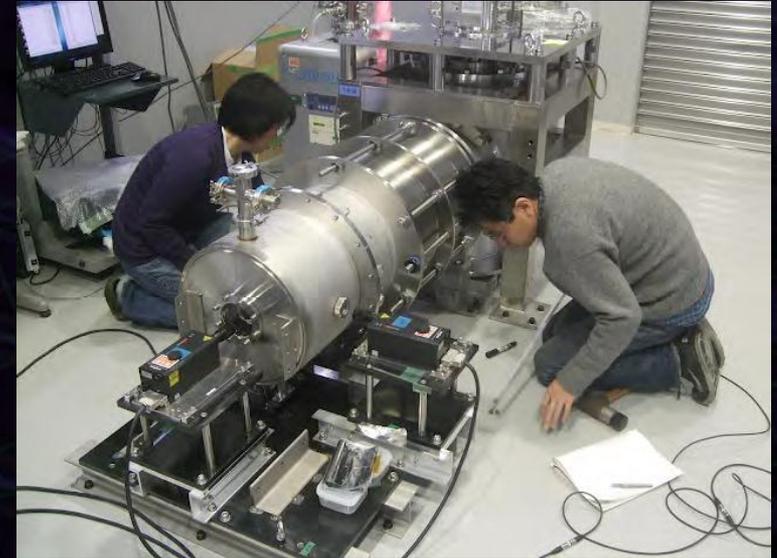
at Toshiba Keihin Factory

低振動型冷凍機

Cryo-cooler units at ICRR (Kashiwa)



Vibration measurement



Storage at
ICRR (Akeno)



T.Suzuki at
External Review
(April 2012)

防振装置

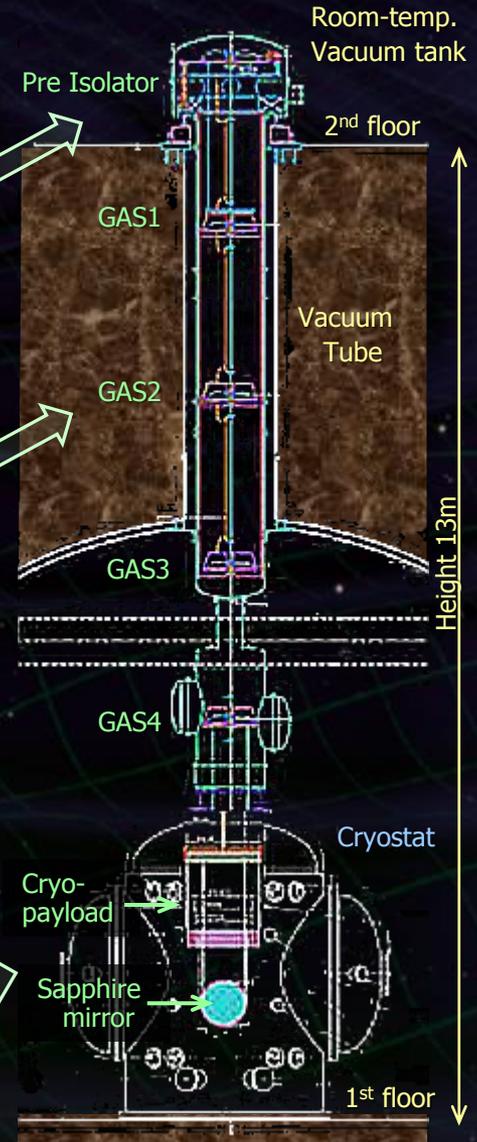
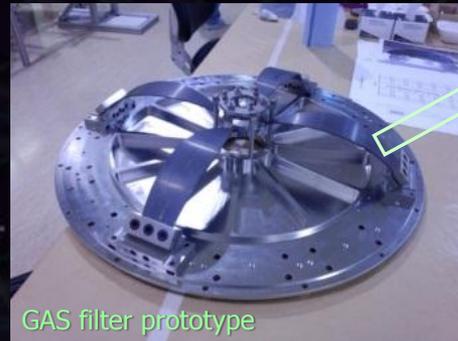


試験マス防振系

- 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)

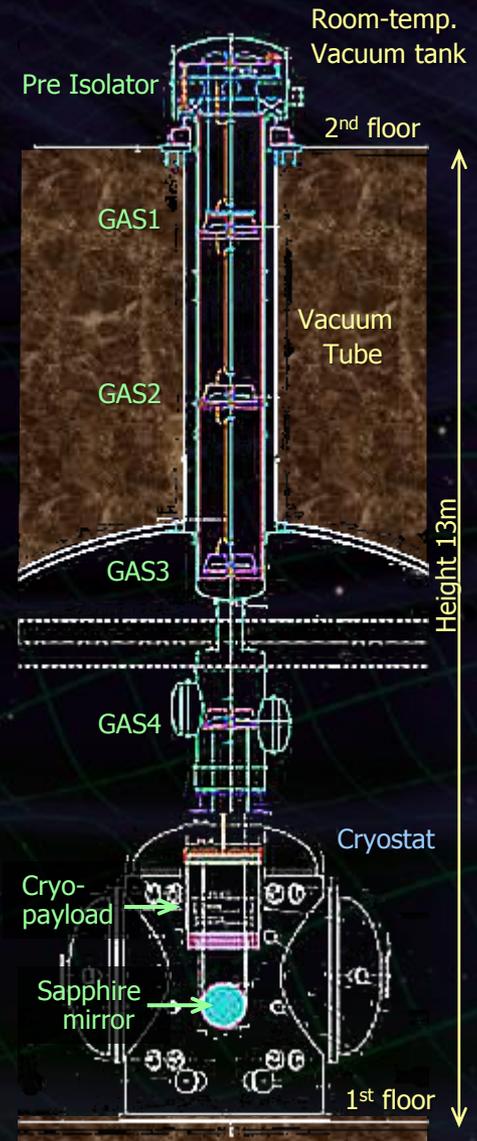
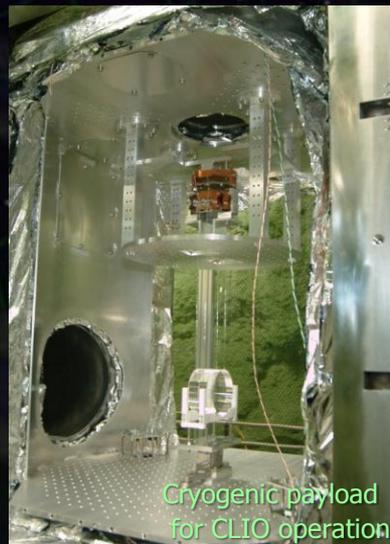
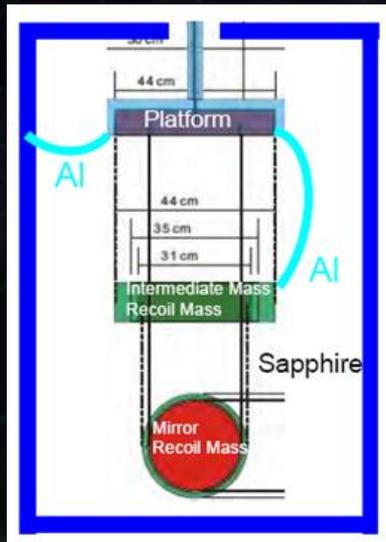


•これまでの干渉計での実績を用いて設計.

- 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)



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

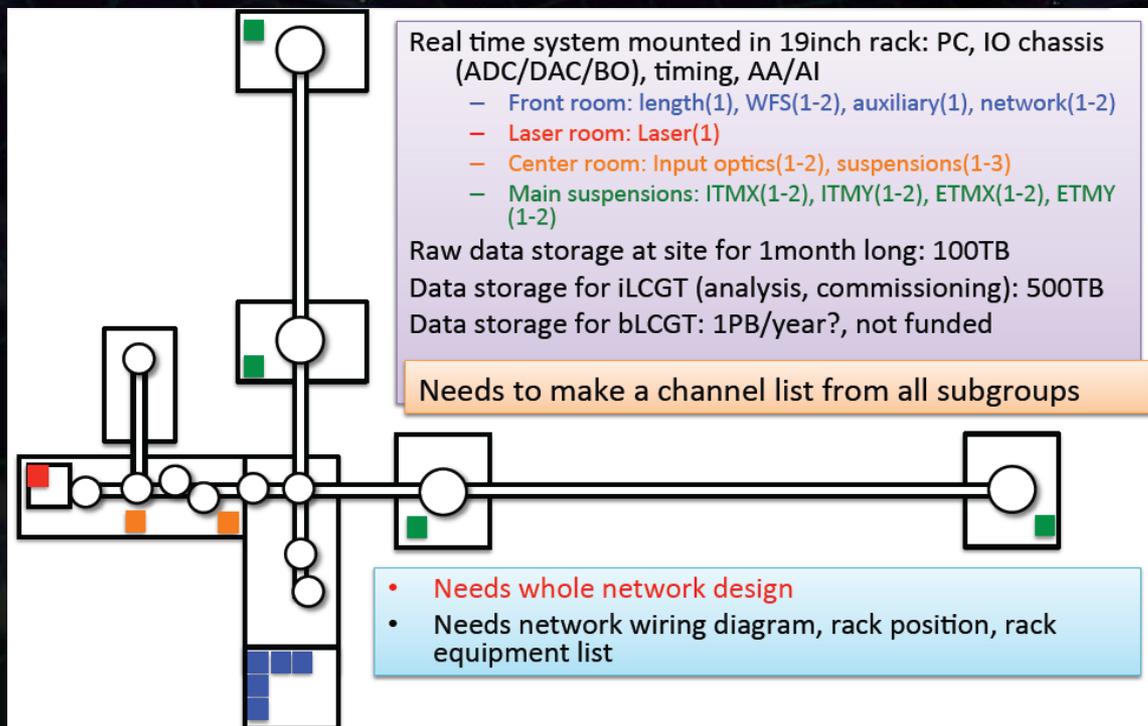
- aLIGOと同等のシステム

→ LIGOの協力のもとCLIOで実証試験.

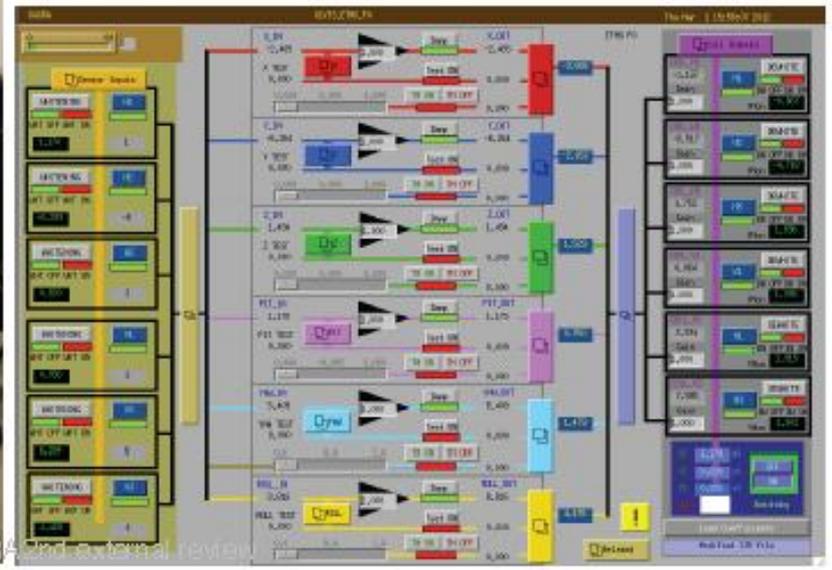
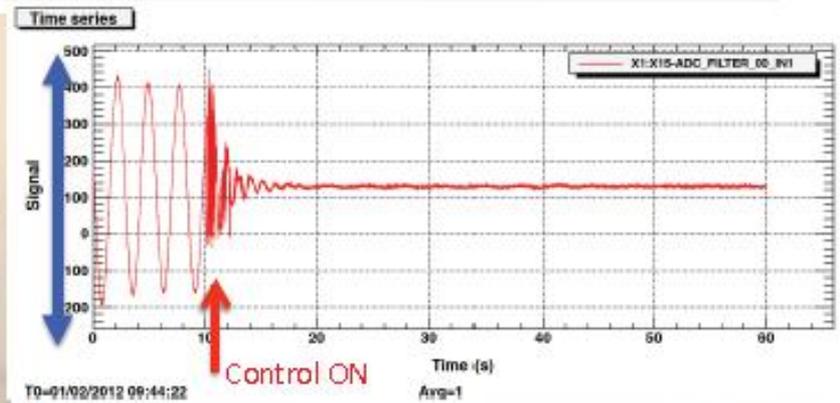
今年度中に5セットを調達.



Digital system installed to CLIO



- Damping of SAS pre-isolator (at ICRR Kashiwa).

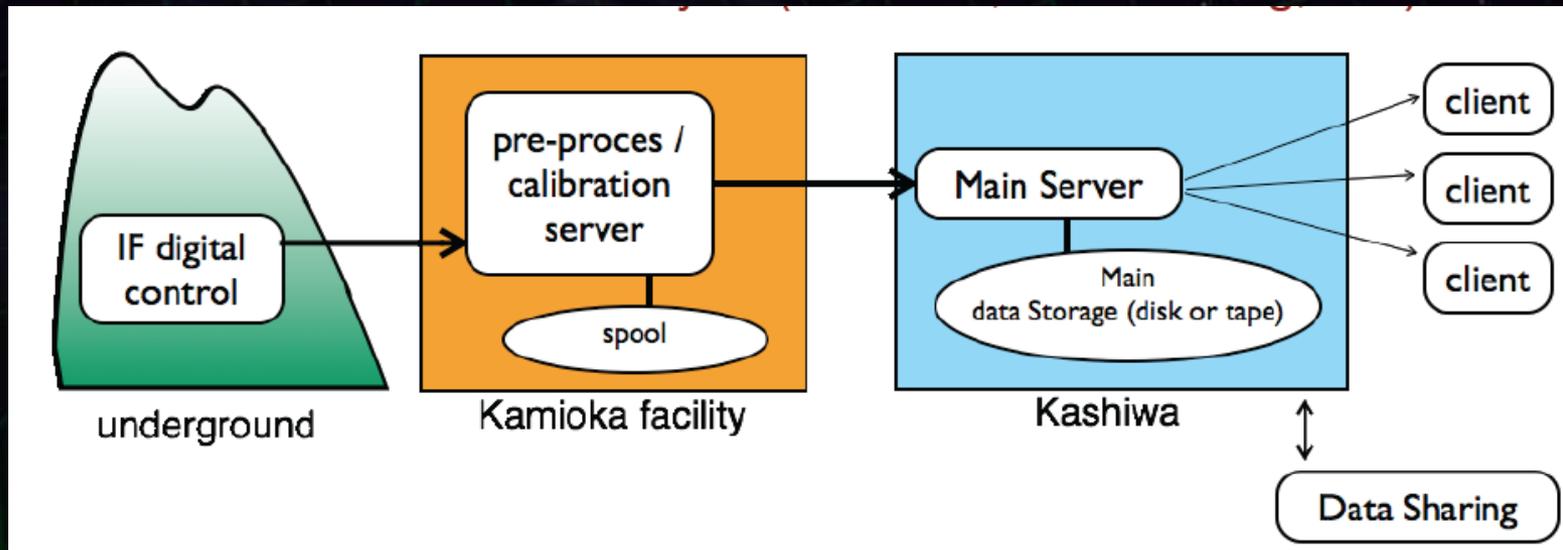


O. Miyakawa at External Review (April 2012)

•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

KAGRA全体スケジュール

• iKAGRA (2010.10 – 2015.12)

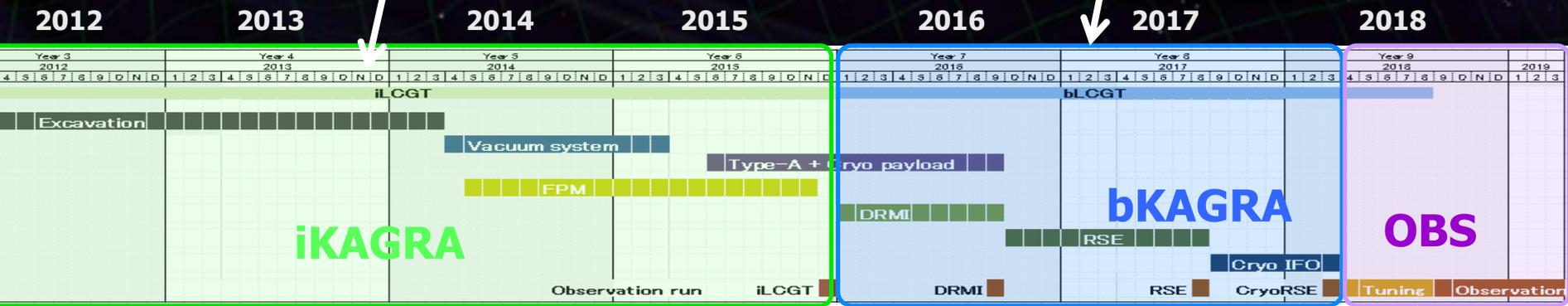
大型干渉計の安定動作を実現

- 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

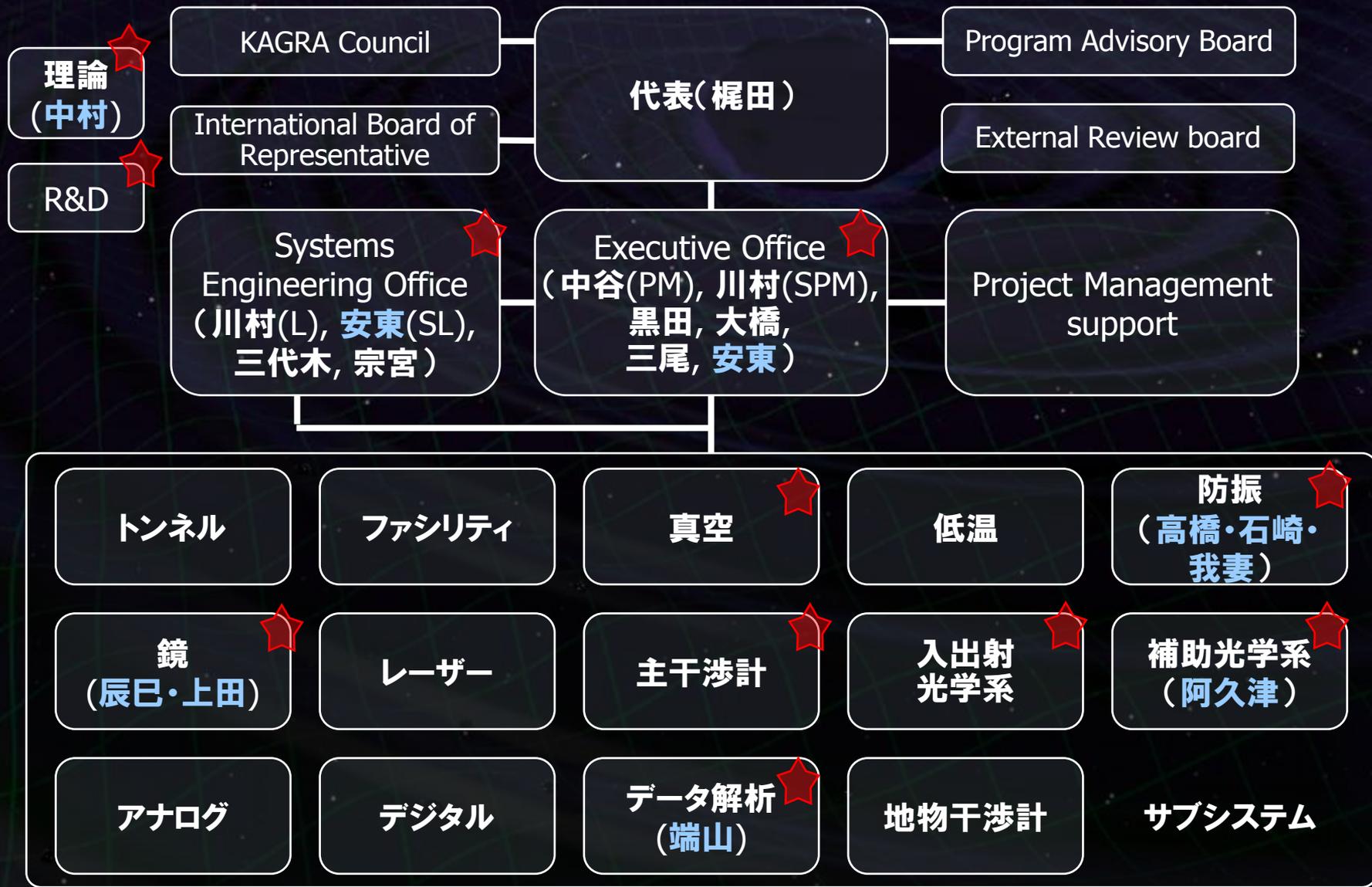
- 干渉計構成, 防振系最終形
- 低温干渉計としての動作.



• OBS (2018.4 -)

長期間観測運転と干渉計チューニング.

KAGRAの組織



主要機関の1つとしてKAGRAの実現に貢献.

・重力波プロジェクト推進室

- 重力波検出器TAMA300の経験 → KAGRA内で主要な役割.
- TAMA施設の活用 → KAGRAの実現性向上, リスク低減.
 - * TAMA300施設を利用した防振系、光学系の実機性能評価.
 - *TAMA300設備(真空槽, 測定器, 光学部品等)のKAGRAへの利用.

・先端技術センター : 重力波プロジェクト推進室と協力しKAGRAを推進.

- KAGRAを重点領域に位置付ける (ATC運営委員会).
- 重力波プロジェクト推進室から安東・阿久津がATC併任.
- 特にAOSサブシステムについて 具体的な議論を開始

まとめ

KAGRA : プロジェクト進行中

- 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.

- 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

設計と建設

- TAMA と CLIO などの経験・実績を生かして設計.
- トンネル掘削が開始された. 真空槽などの製作も進行中.

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