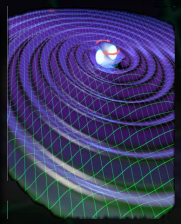
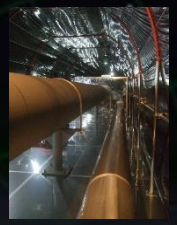
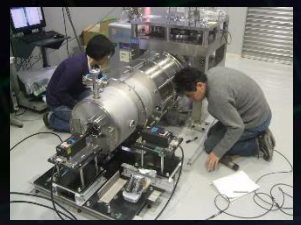
重力波望遠鏡KAGRA が切り拓く天文学

安東 正樹 (東京大学 物理学専攻/国立天文台)



大型低温重力波望遠鏡

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-)

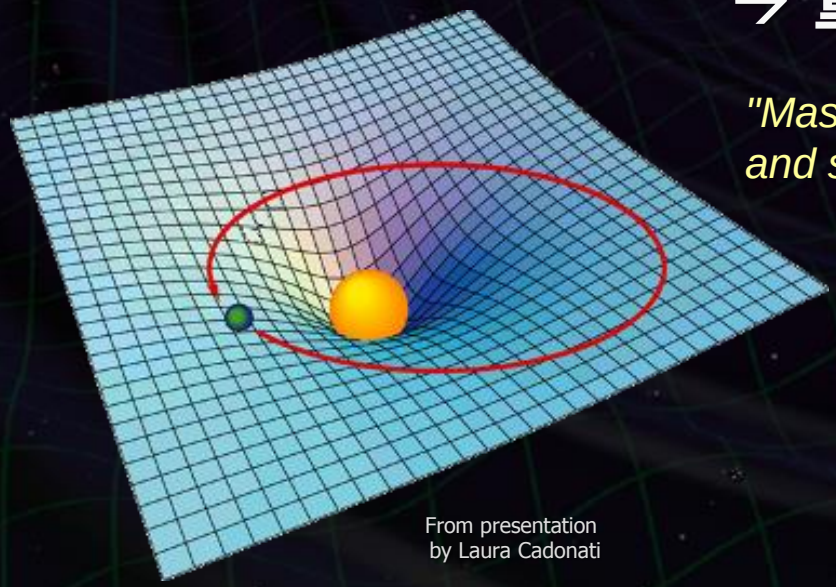
⇩

重力波天文学の創成

- 重力波による天文学
- 重力波望遠鏡
- KAGRAの概要・現状

重力波による天文学???

重力波

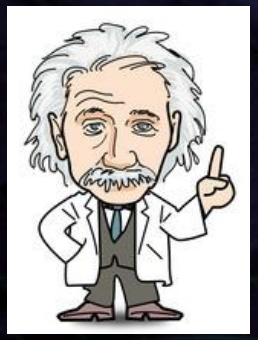


From presentation
by Laura Cadonati

一般相対性理論

→ 重力を時空の性質と解釈

"Mass tells space-time how to curve,
and space-time tells mass how to move."



物質の変動, 形状の変化

→ 重力場の変動

→ '時空のさざなみ'として伝播

重力波

電磁波と重力波

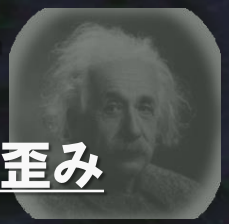
電磁波

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

重力波

A. Einstein

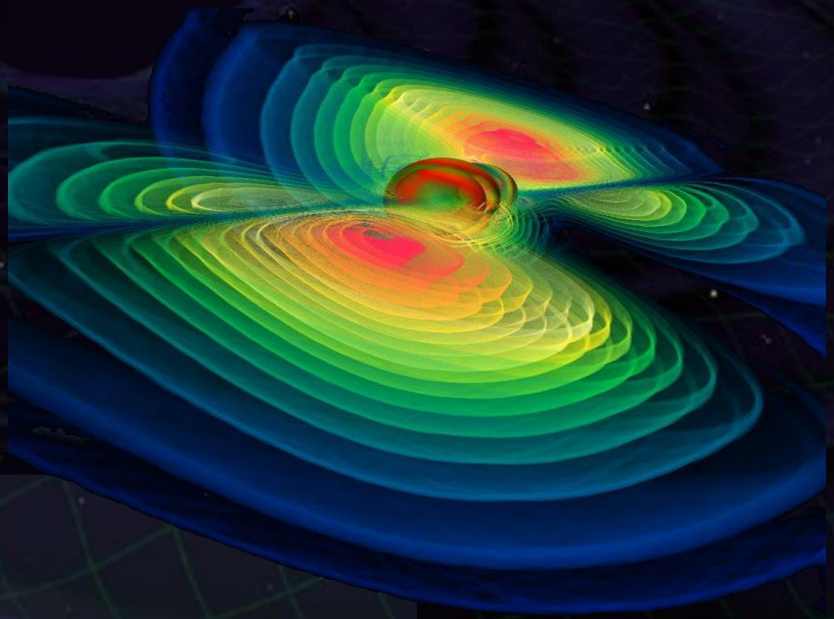


- 光速で伝播する時空の歪み
- 一般相対性理論：
  アインシュタイン方程式の波動解
- 質量の加速度運動により生成
- 物質に対して 強い透過力

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

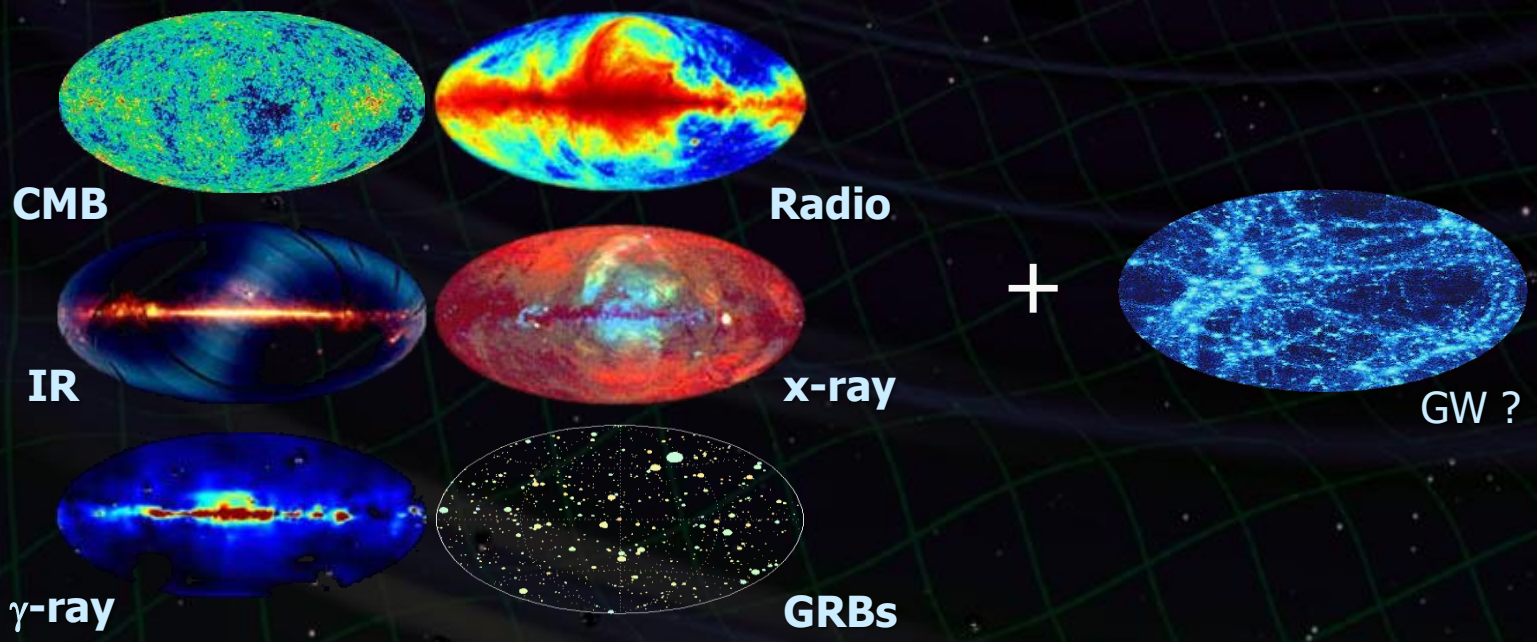


宇宙を観測する新しい手段

- 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)

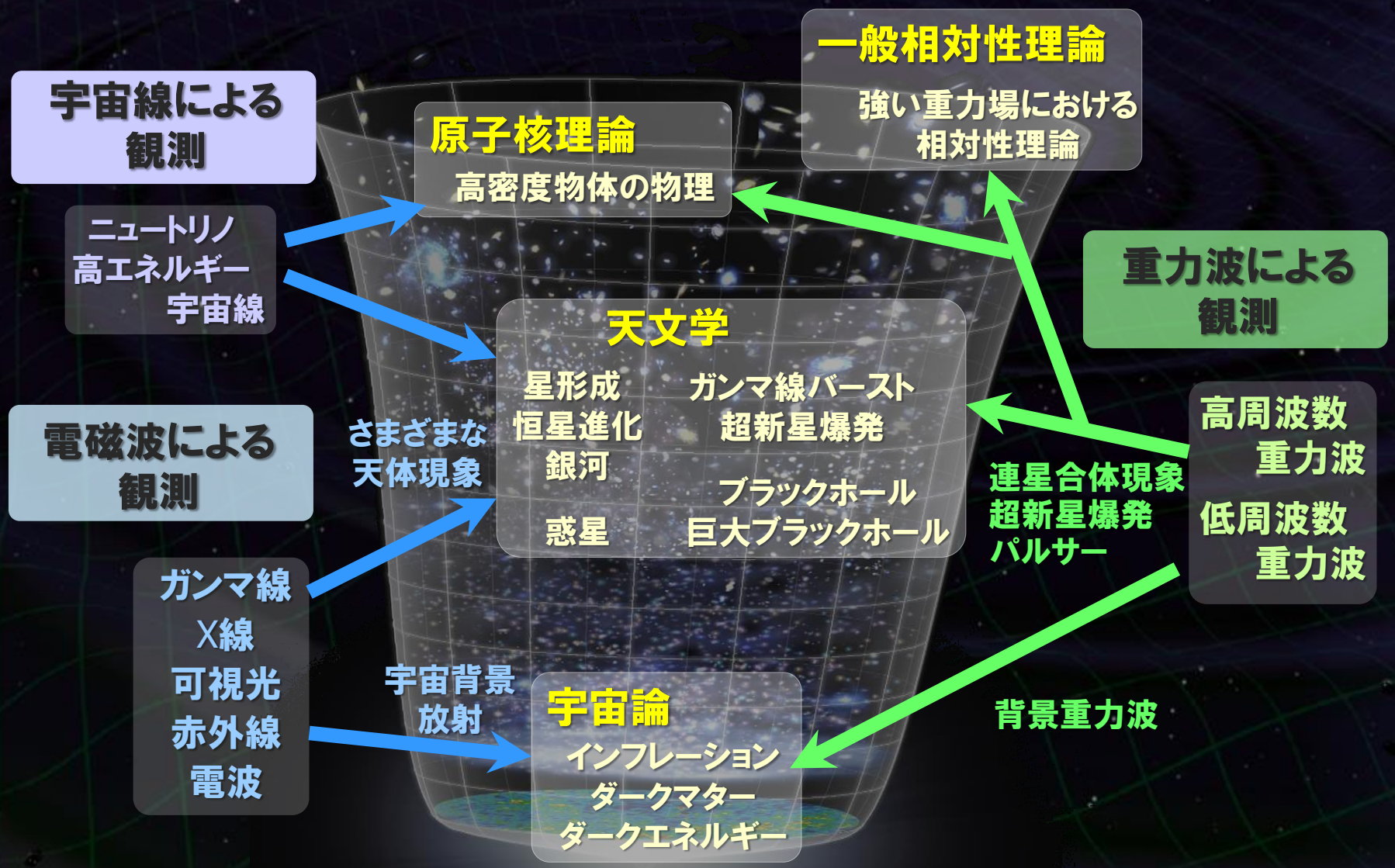
重力波による天文学

宇宙を観測する新しい手段 → 新しい発見!!!



重力波で宇宙を探る

KAGRA



背景画: NASA/WMAP Science Team

宇宙の誕生と進化

138億年
10億年
38万年
3分
10^{-34}秒
ブラックホール
地球、
生命
晴れ上がり
宇宙の
はじまり
インフ
レーション
ファーストスター
銀河
原子核の形成
星・銀河
の形成
宇宙の
加速膨張
高エネルギー
宇宙線
X線
重力波
ニュートリノ
マイクロ波
電波
光・赤外

… しかし，重力波はまだ捕まっていない．

⇨ 物理学・天文学の新たなフロンティア

- 天文学：宇宙を調べる新しい手段．
- 宇宙論：初期宇宙の直接観測．→ 宇宙の誕生と進化．
- 物理学：相対論検証，極限状態の物理．

→ 究極の物理法則．

耳をすます!!!

- 重力波望遠鏡 -

電磁波と重力波

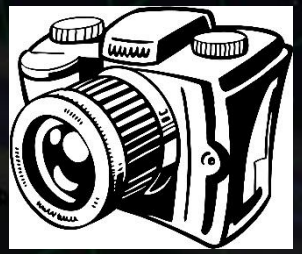
電磁波

- 光速で伝播する
  電磁場の変動
- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱

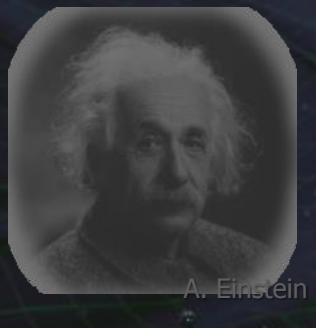
⇩

波源の各所から放射

→ 画像として観測.



重力波



- 光速で伝播する
  時空の歪み
- 質量の加速度運動により生成
- 物質に対して 強い透過力

⇩

波源全体の運動から放射

→ 時系列変動
として観測.

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

$$h \sim \delta L / L$$

δL ：距離変動

L ：2点間の距離

$h = 10^{-21}$ → 1mの距離が10^{-21}m 伸縮.

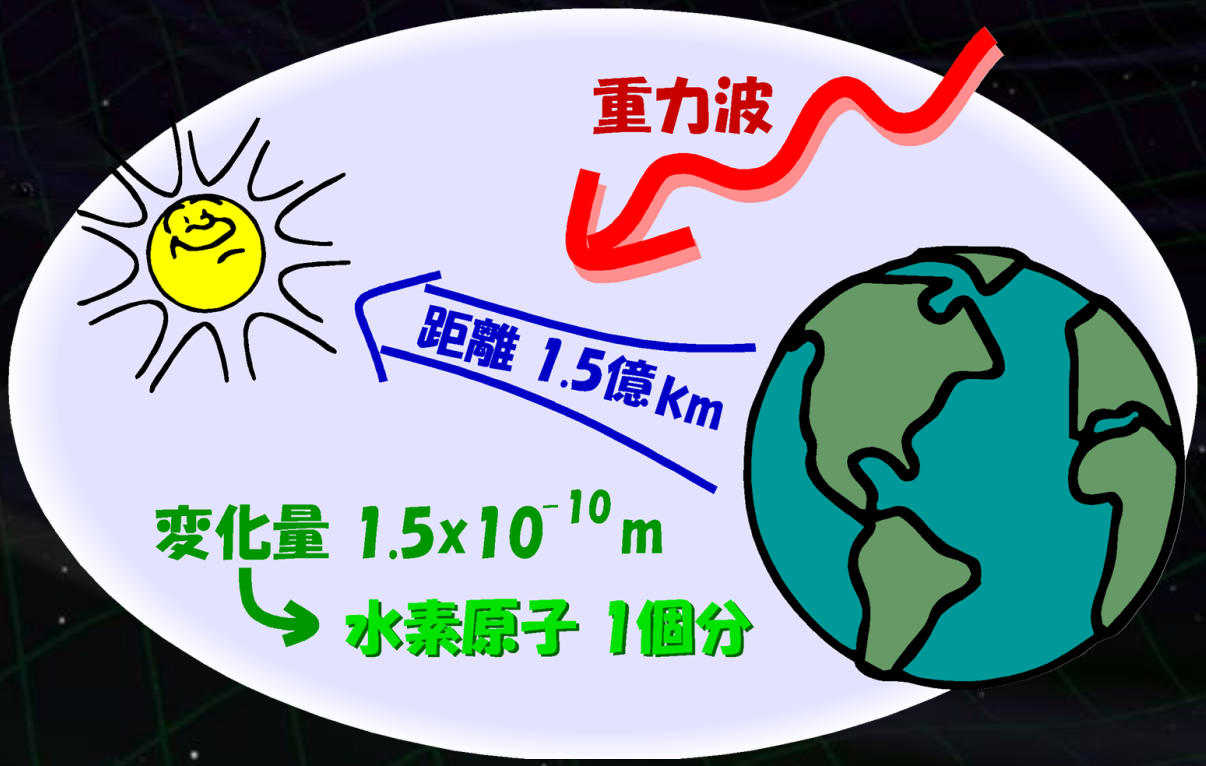
重力波の効果

（例） 地球-太陽間の距離変動

距離　　1.5×10^{11} m

重力波振幅　10^{-21}

⇨　1.5×10^{-10} m の距離変動



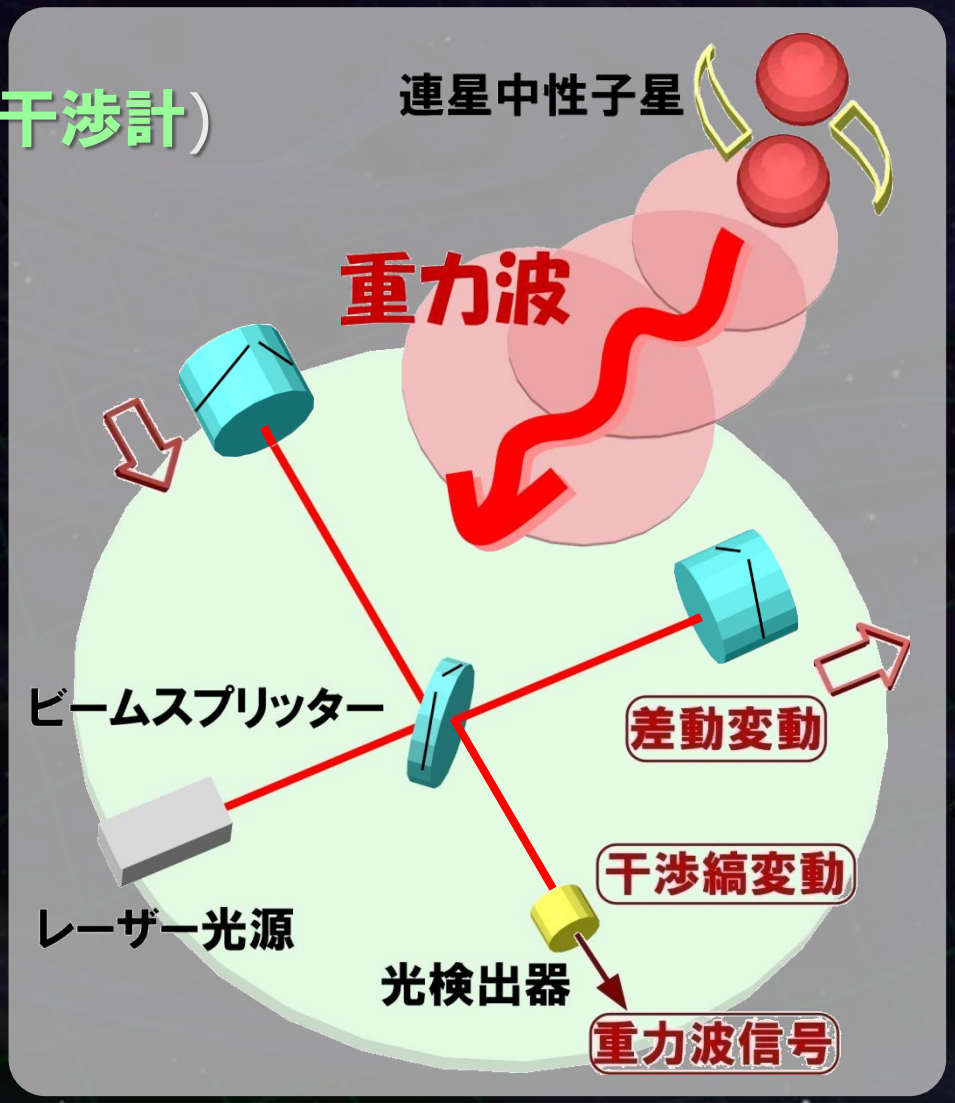
レーザー干渉計型重力波検出器

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

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)

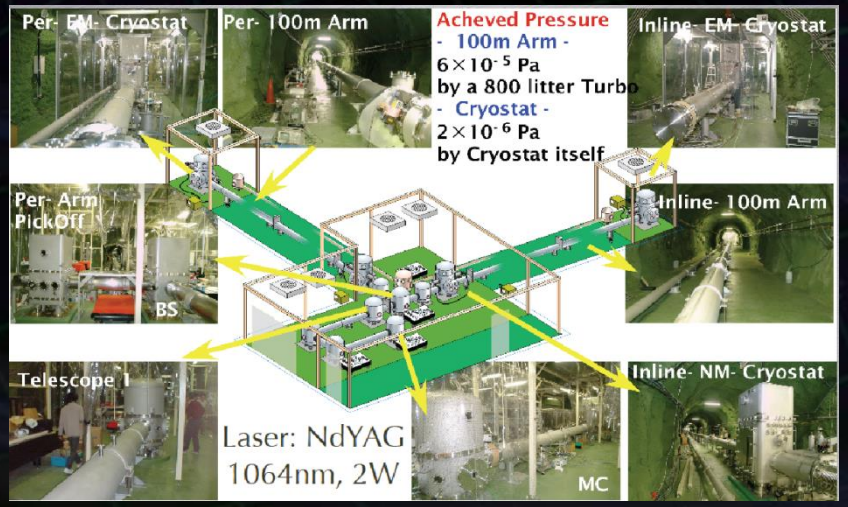
Ando+, PRL 86, 3950 (2001)

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)



本格的な天文学

ただ… 第1世代干渉計で検出できるような
重力波イベントは稀　(10^{-4}-10^{-2} event/yr)

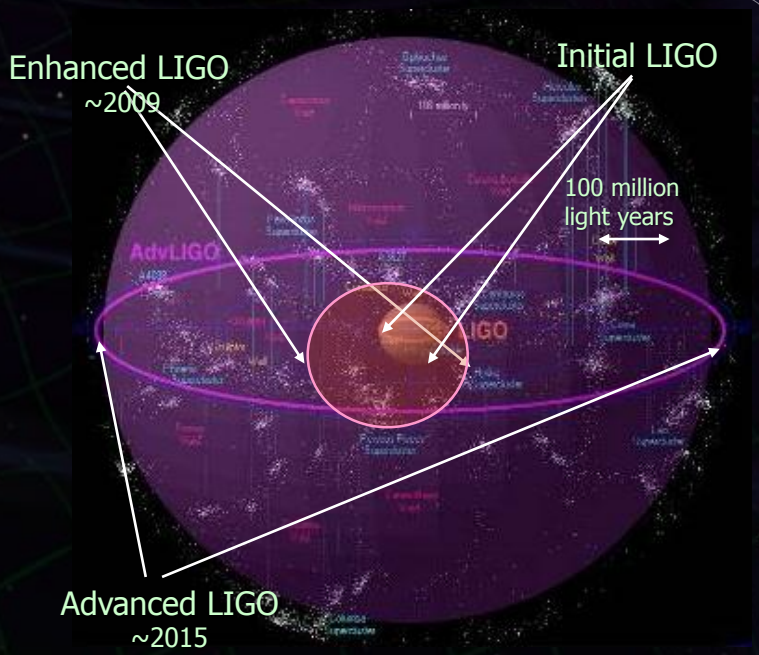
⇨ 約1桁感度を向上した 第2世代の重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅)　∝ 1/(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



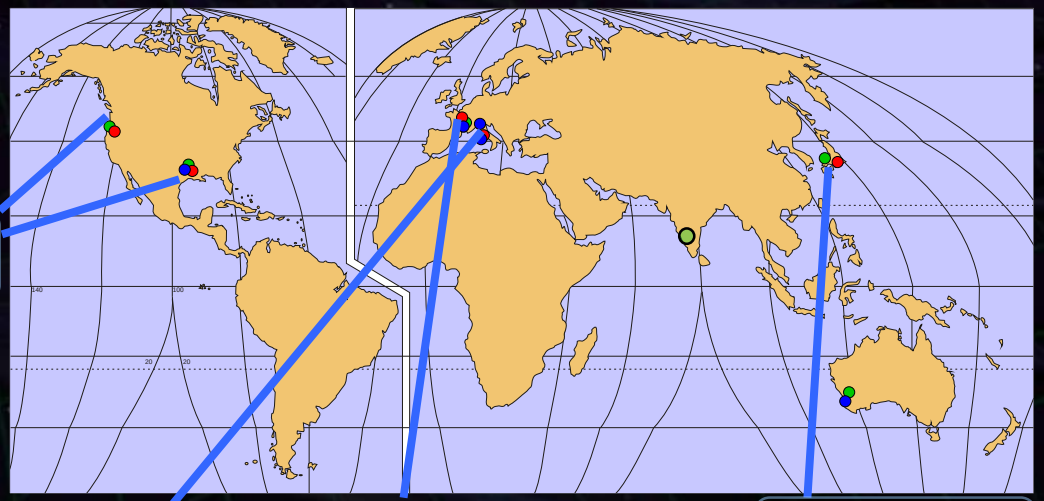
第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

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, 位置, 物理情報, ...)

aLIGO (USA)
4km x 2 (or3)



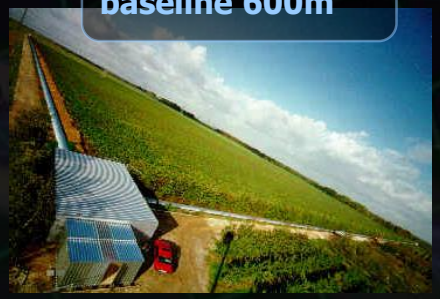
Austreria
in proposal

LIGO-India
in proposal

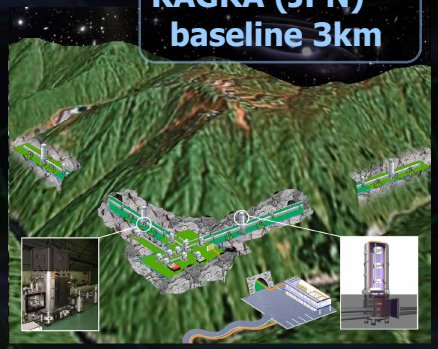
indigo

Adv.VIRGO (ITA-FRA)
baseline 3km

GEO-HF (GER-UK)
baseline 600m



KAGRA (JPN)
baseline 3km

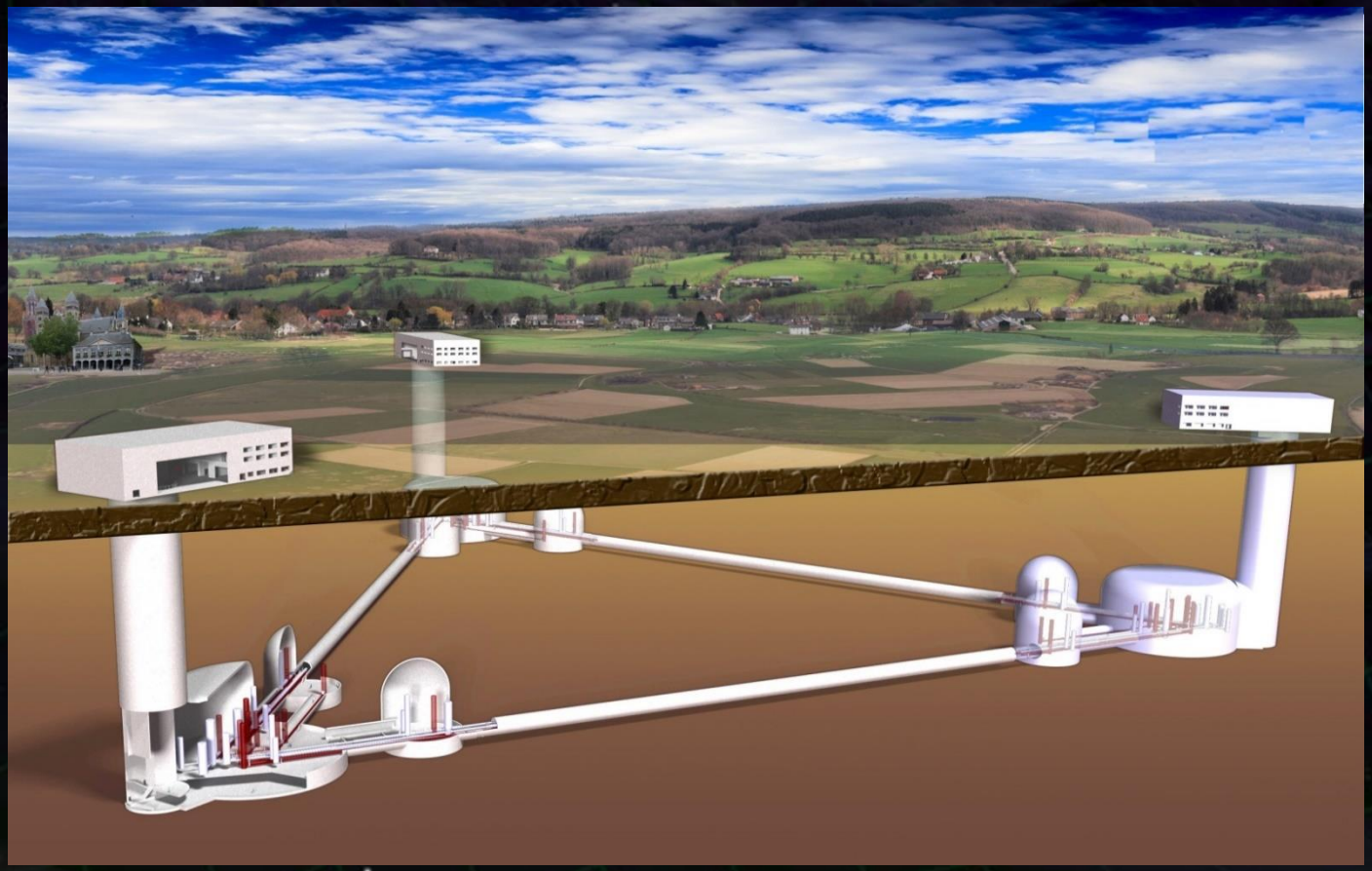


第3世代 重力波望遠鏡

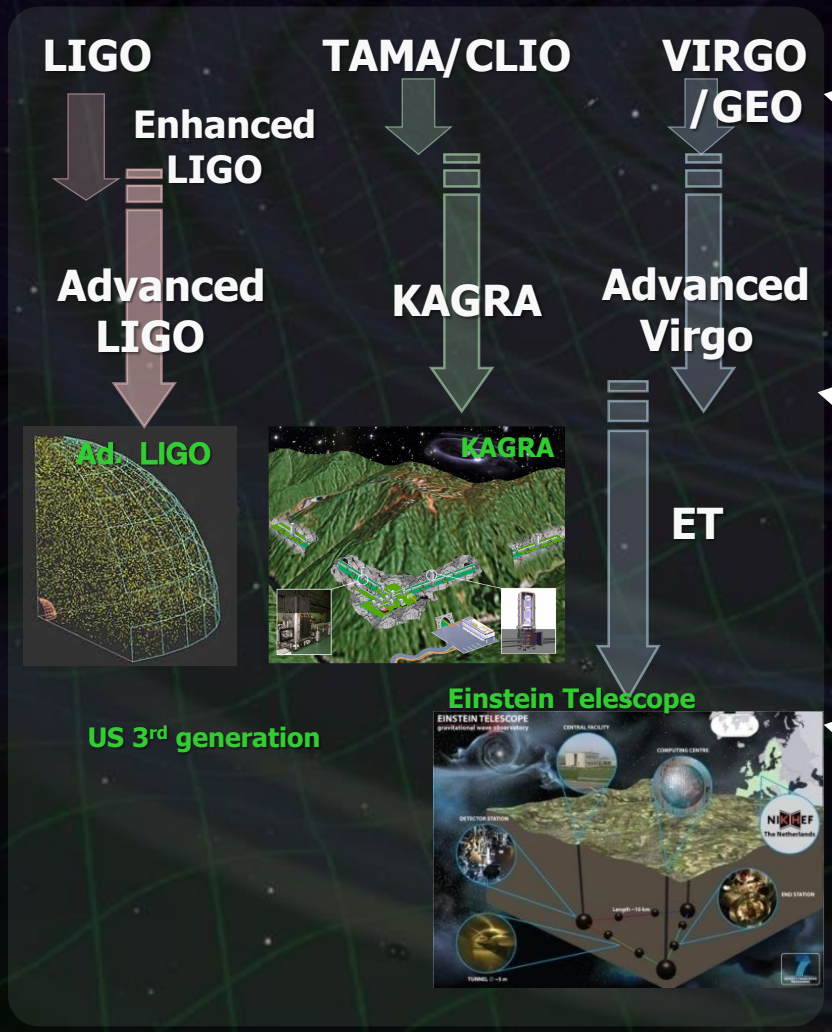
第3世代望遠鏡：ET (Einstein Telescope)

さらに一桁の感度向上，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



- **1st Generation detector**
  Obs. range: ~20Mpc
  Rate: 10^{-4} – 10^{-2} event/yr
  → 幸運なイベント, 上限値

- **2nd Generation detector**
  Obs. Range: ~200Mpc
  Rate: ~10 event/yr
  → 確実な検出, 天体物理

- **3rd Generation detector**
  Obs. Range ~3 Gpc
  Dairy detection
  → 宇宙論

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

基線長3kmの大型干渉計

2017年頃本格的な観測開始 → 重力波天文学の創成.

低温技術・地下干渉計 → 次世代干渉計技術.

・ホスト機関：

東京大学 宇宙線研究所

・副ホスト機関：

国立天文台
高エネルギー加速器研究機構

・国内外の研究機関

東京大 理・工・地震研,
大阪市大, 東工大, 大阪大,
京都大, 産業技術総合研究所,
情報通信研究機構, 電気通信
大, 山梨英和大 など.

- 約1年前、大型低温重力波望遠鏡 LCGT

  (Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

  に愛称がつきました.

かぐら KAGRA

- かぐら (神楽) : 神に奉げる歌や踊り.
- Acronymではないが、

  KA (Kamioka)

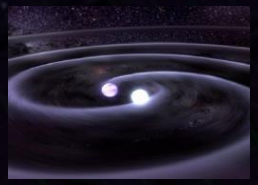
  + GRA (Gravitational Wave Antenna)

  の意味合いもある.

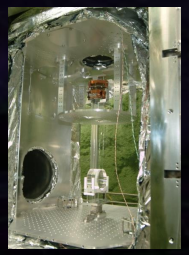
重力波望遠鏡の高感度化

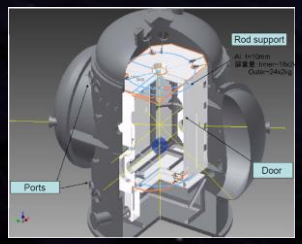
KAGRA

- **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

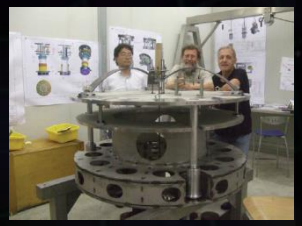


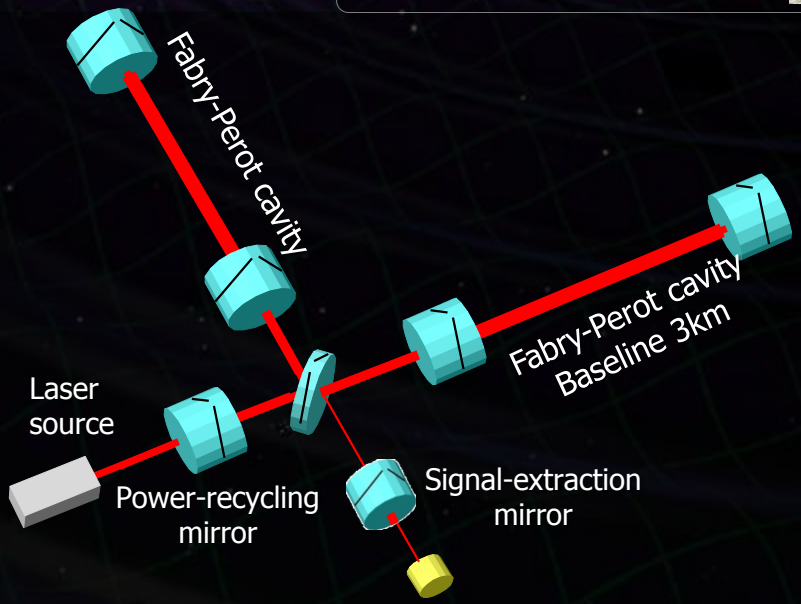
- **鏡・振り子の熱雑音**
  - 鏡・振り子の低温化
  - 材質の機械損失



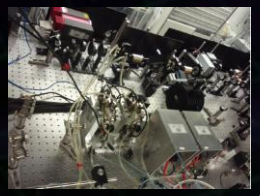


- **地面振動の影響**
  - 静寂な地下サイト
  - 高性能防振装置

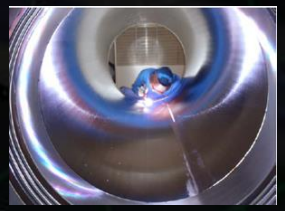




- **光の量子雑音**
  - 大型干渉計
  - 干渉計方式の工夫
  - 高出力レーザー光源
  - 高性能鏡

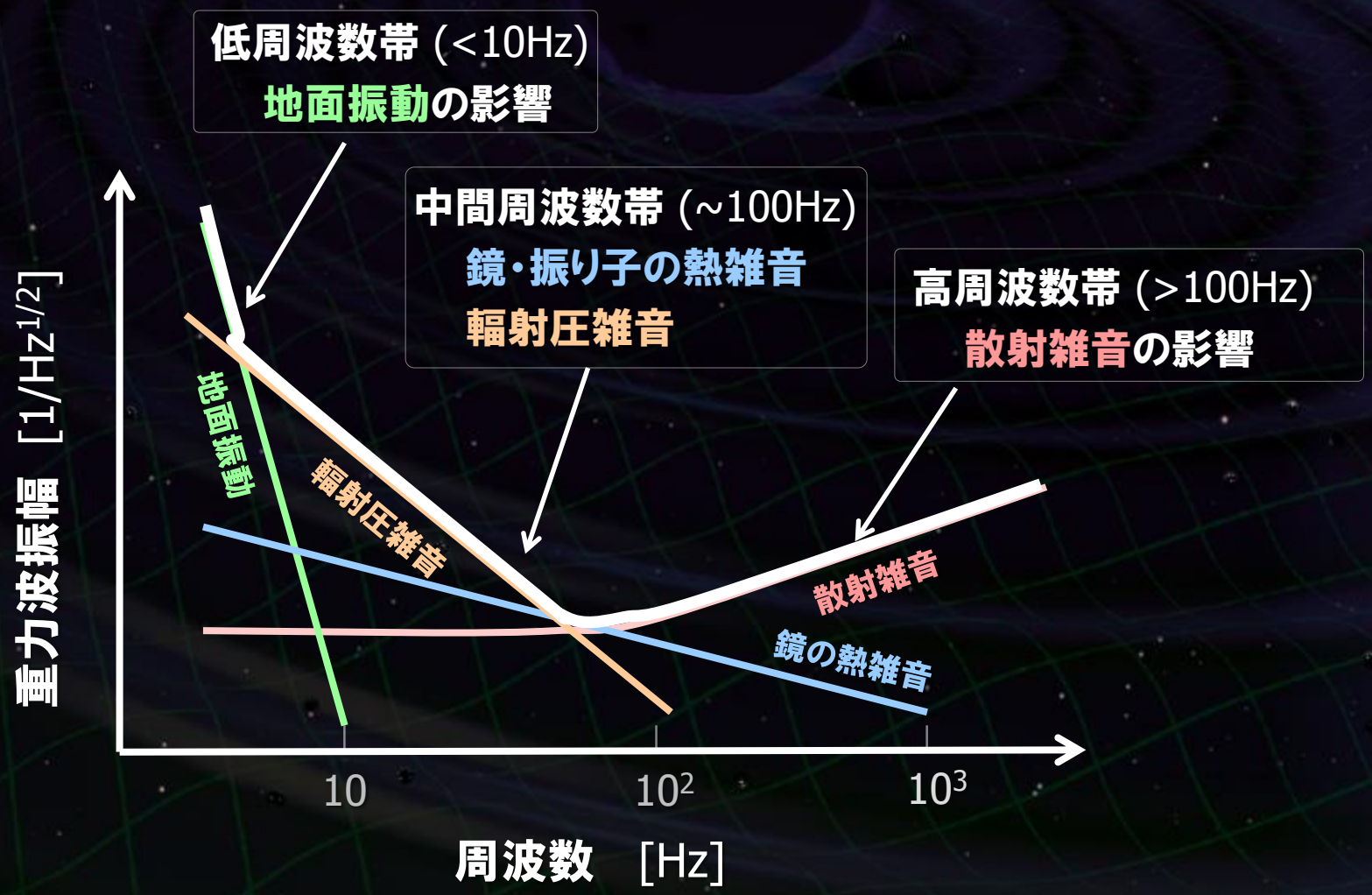


- **真空システム**
  - 光路長の揺らぎ
  - 音響雑音などの低減



- **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


低周波数帯 (<10Hz)
地面振動の影響
中間周波数帯 (~100Hz)
鏡・振り子の熱雑音
輻射圧雑音
高周波数帯 (>100Hz)
散射雑音の影響
地面振動
輻射圧雑音
散射雑音
鏡の熱雑音
重力波振幅 [1/Hz^1/2]
10
10^2
10^3
周波数 [Hz]

光の量子雑音

KAGRA

・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

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

- **輻射圧雑音** (Radiation Pressure Noise)

  鏡での反射時の光子反跳雑音

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

[P : 干渉計入射光パワー]

標準量子限界 (Standard Quantum Limit)

$$h_{\mathrm{SQL}} \propto \frac{1}{\sqrt{M\ L^2}}$$

[M : 鏡の質量
L : 基線長]

⇨ 長い干渉計基線長
大質量鏡

KAGRA : 大型・大光量干渉計

基線長 3km, 鏡質量 22kg, 干渉計内光パワー ~400kW

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

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

KAGRA：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.

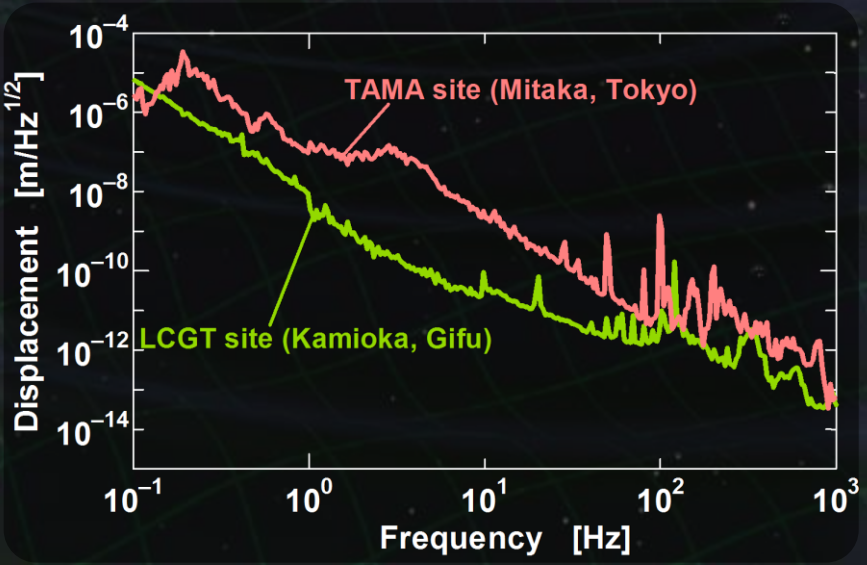
地面振動の影響低減

- 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.

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

(神岡サイトでの値, f：周波数,)

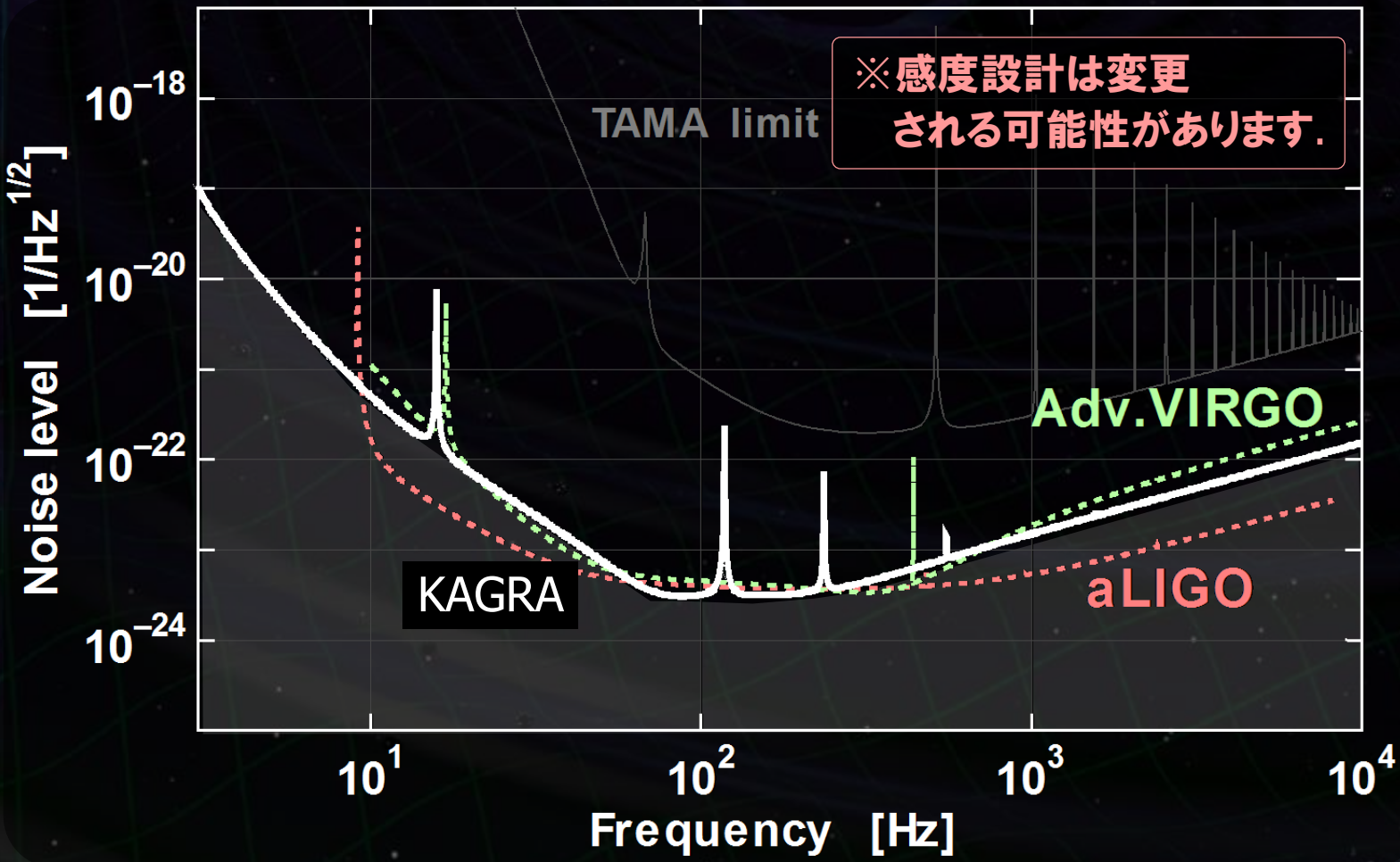


KAGRA：地下サイトに建設 → 2-3桁小さい常微動, 長期安定な環境.
高性能防振装置 SAS：多段・低周波の防振装置.

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

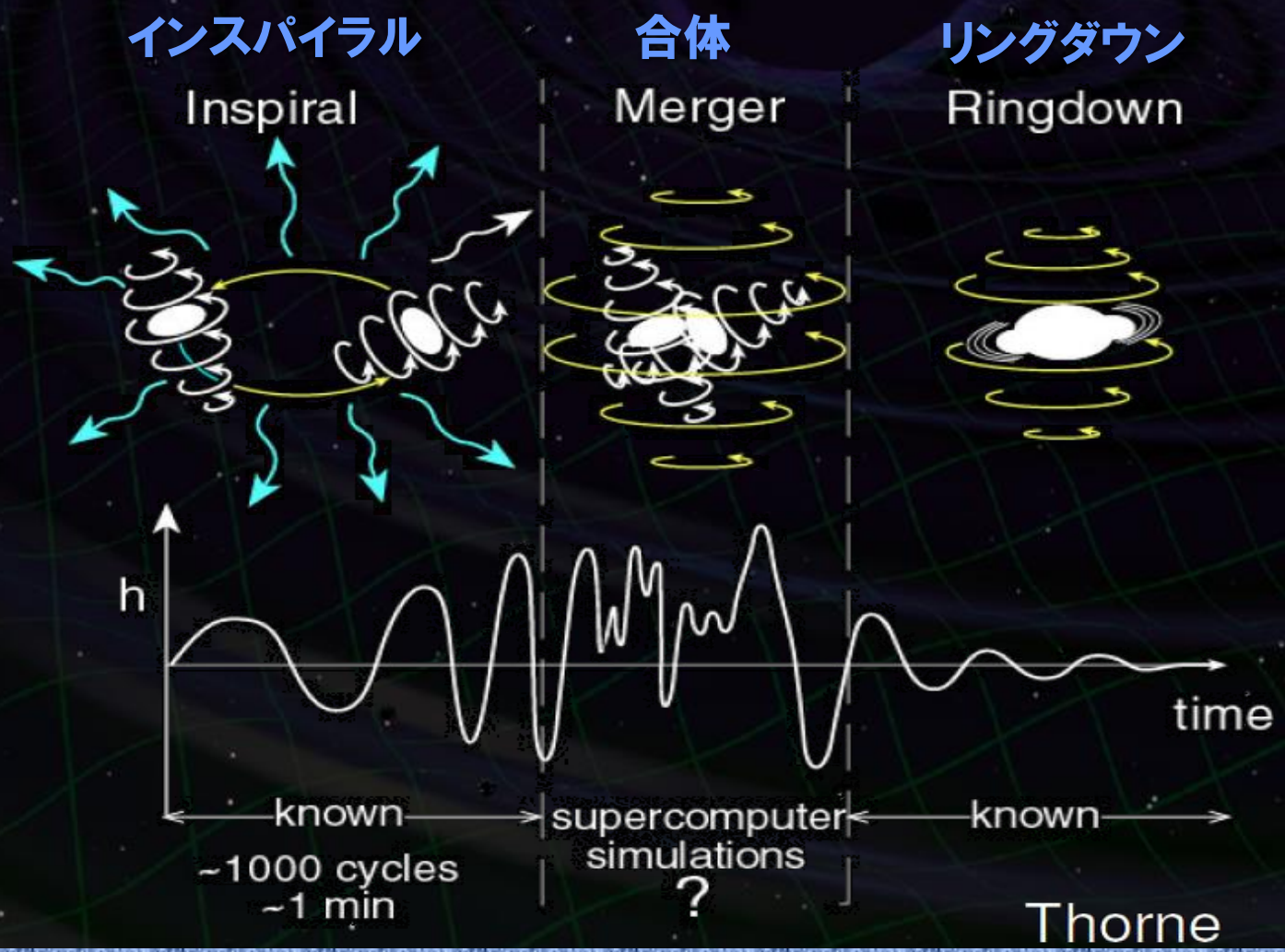


主な重力波源

CG/KAGAYA

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



(例) 連星合体からの重力波

チャープ波

時間と共に振幅・周波数が増大.

→最終的に合体, BHになる.

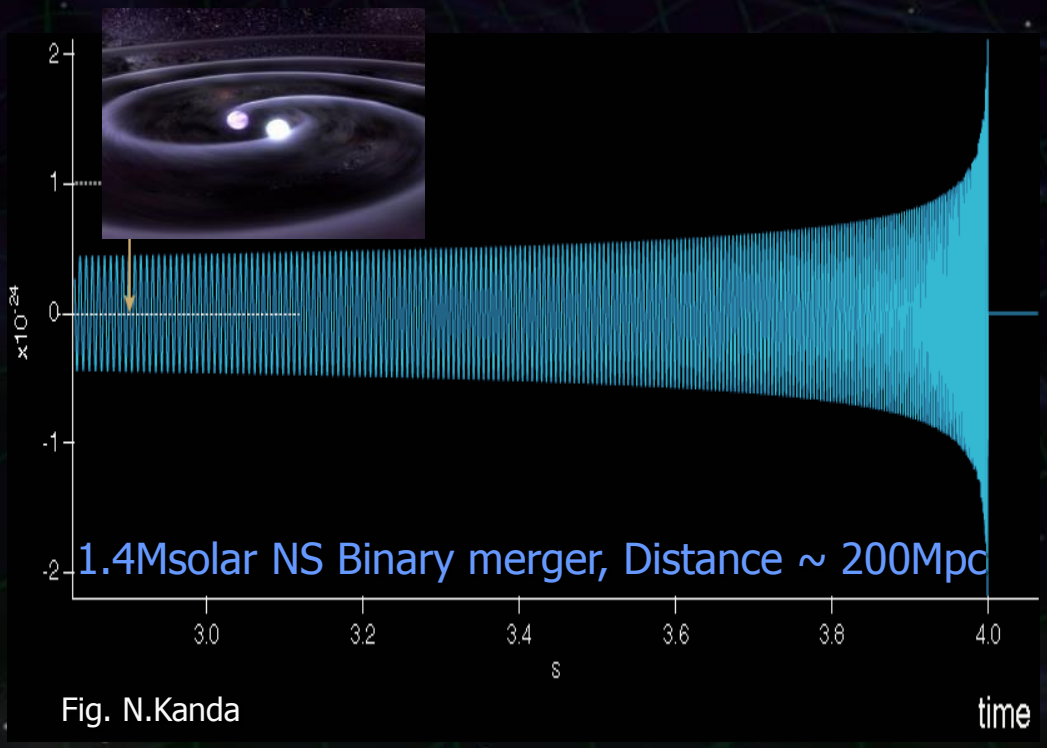
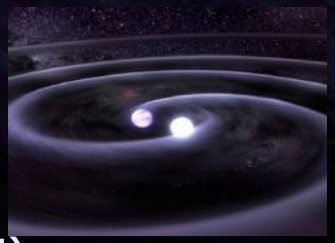


Fig. N.Kanda

KAGRAの観測確率

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：

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

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

銀河あたりのイベントレート:

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

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)

KAGRA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
  波形, 偏波などの情報 → 天体現象の情報.
  波源の位置の特定 → 電磁波観測も含めた波源の理解.

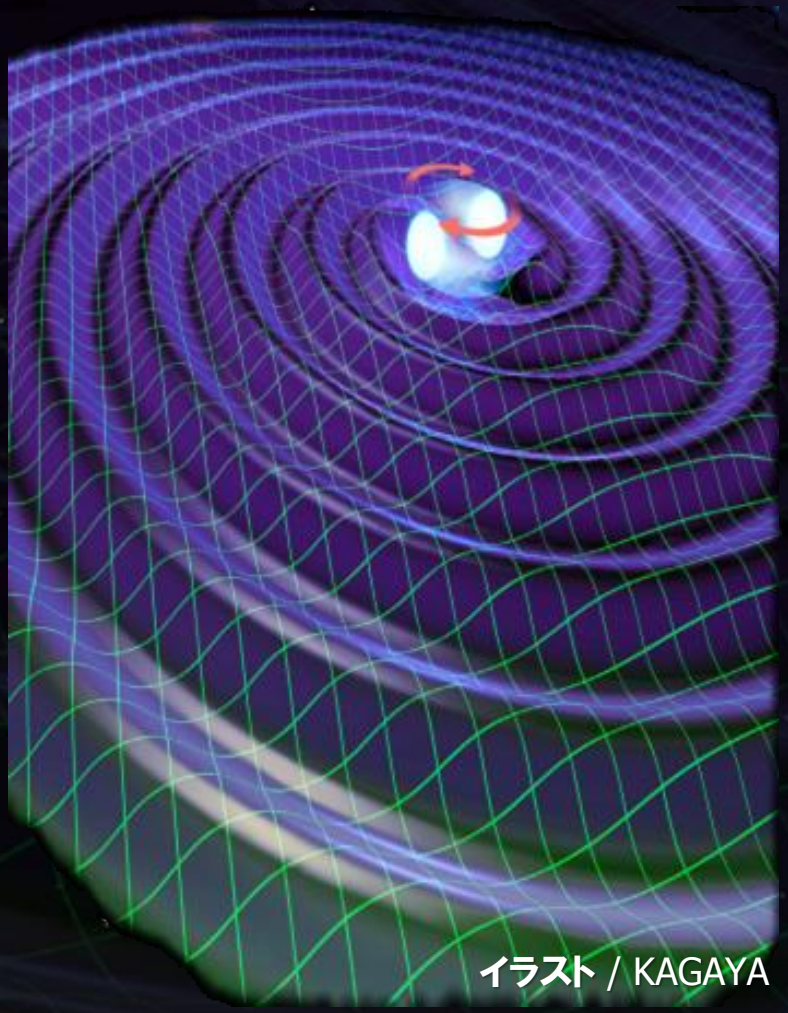
・先進的な干渉計技術の実証

- 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.

観測できたら???

- 観測で期待できる知見 -

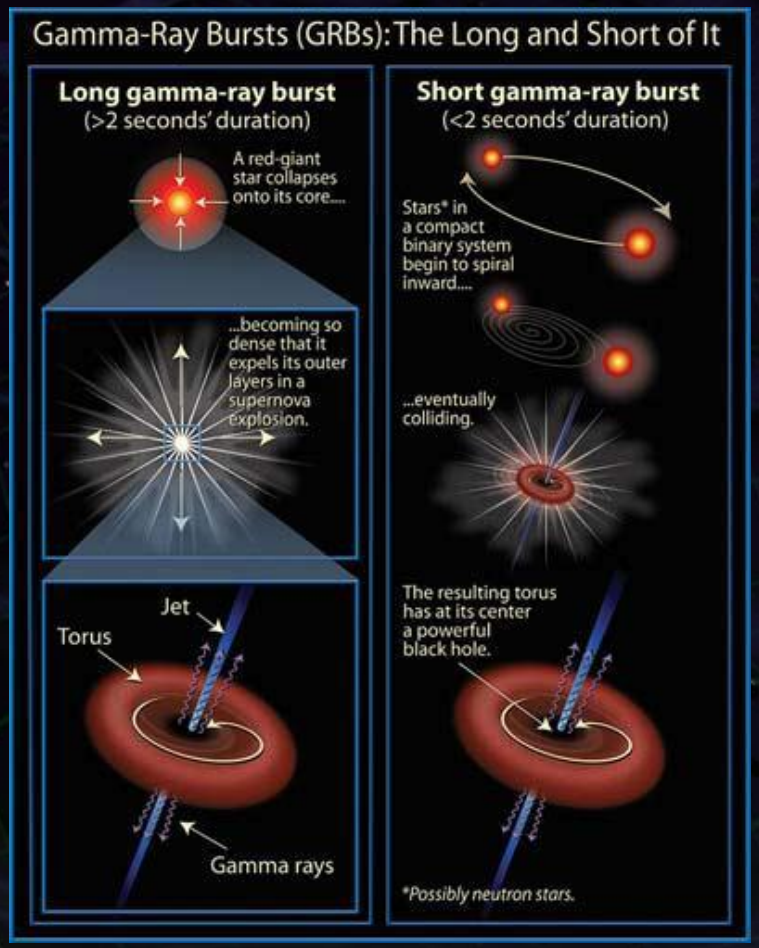


連星合体観測による知見

- 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.

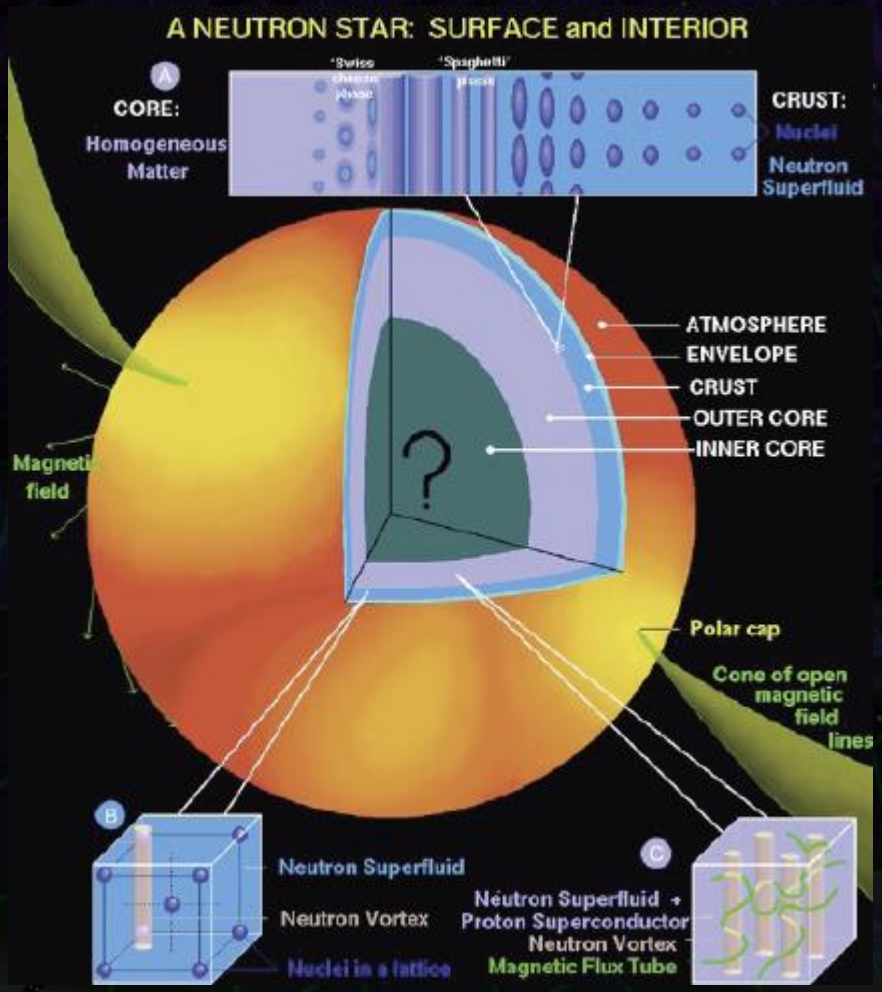
- 高密度核物質の直接探査
  - 中性子星の状態方程式の情報.
  - 潮汐変形/破壊, HMNSの形成など.

- 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

中性子星の構造



中性子星

- ~太陽質量, 半径~10km の高密度天体.
- 中心部密度：$2 \sim 15\rho_0$

ρ_0 は標準原子核密度

$$\rho_0 = 2.8 \times 10^{17}\ [\mathrm{kg/m^3}]$$

核密度以上の性質は ほとんど理解されていない.

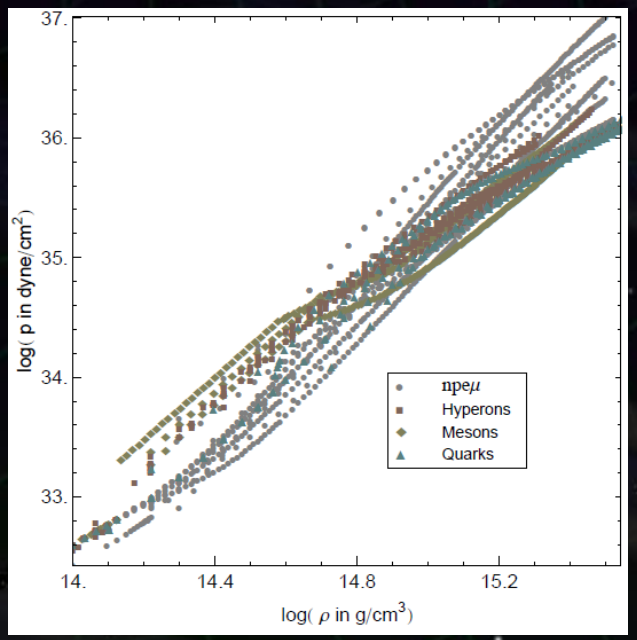
中性子星の状態方程式

高密度核物質の状態方程式 (EoS, Equation of State)

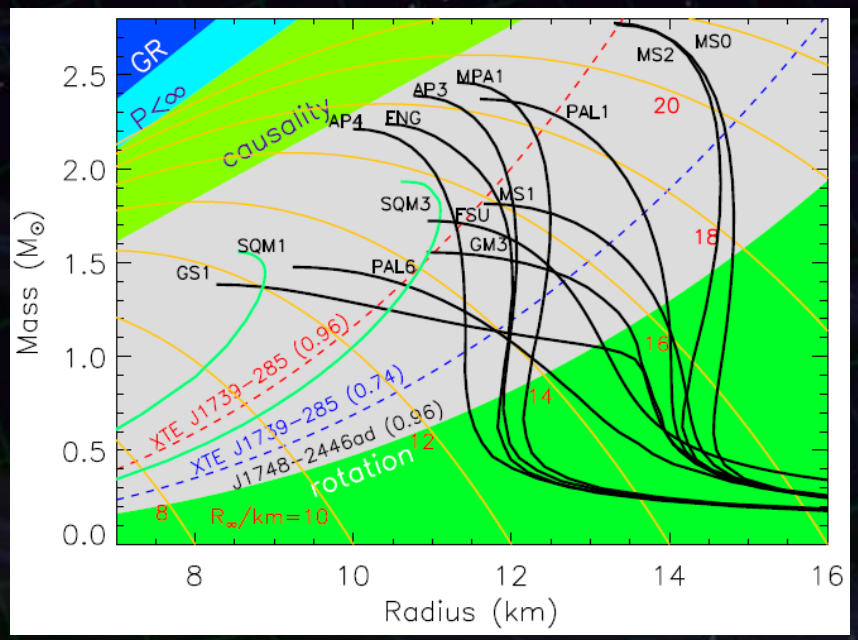
- 高エネルギー天体現象 (連星中性子星合体, 超新星爆発)
- 原子核物理 (ハイペロン, クォーク, 中間子凝縮)

- 高密度EoSと質量-半径が対応.
- 各EOSに応じた最大質量 $M_{\rm max}$ が存在

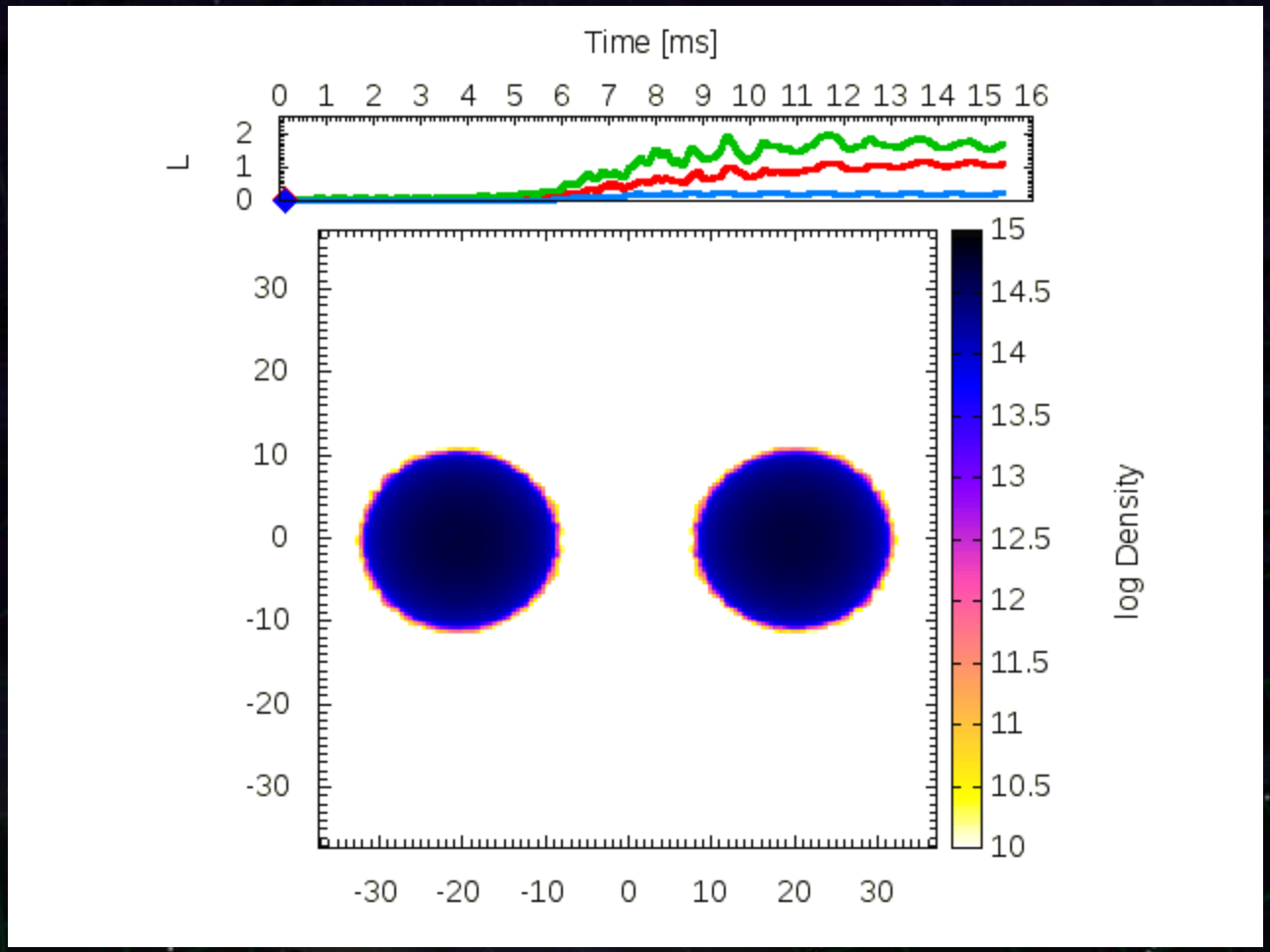
Lattimer+ (2010)



一般相対論的
静水圧平衡



数値相対論計算



連星中性子星の合体数値シミュレーション by 関口氏

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

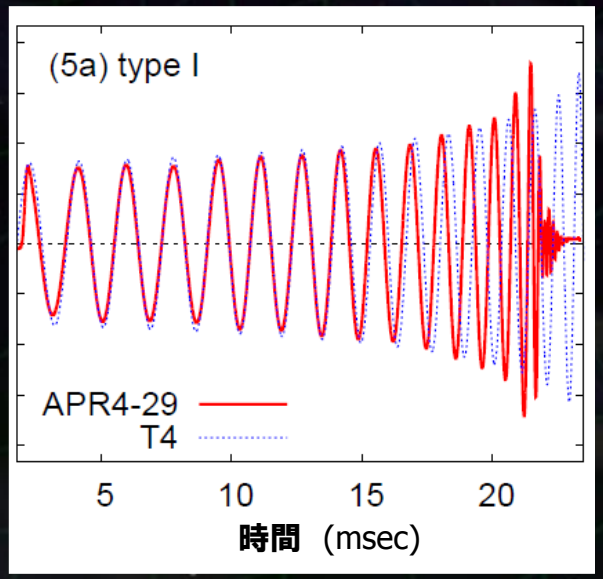
HMNS形成

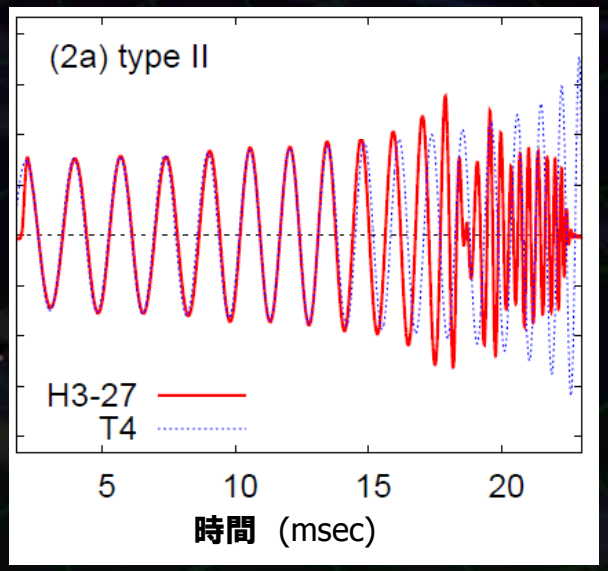
遠心力によって
$M > M_{\rm max}$
を支える中性子星

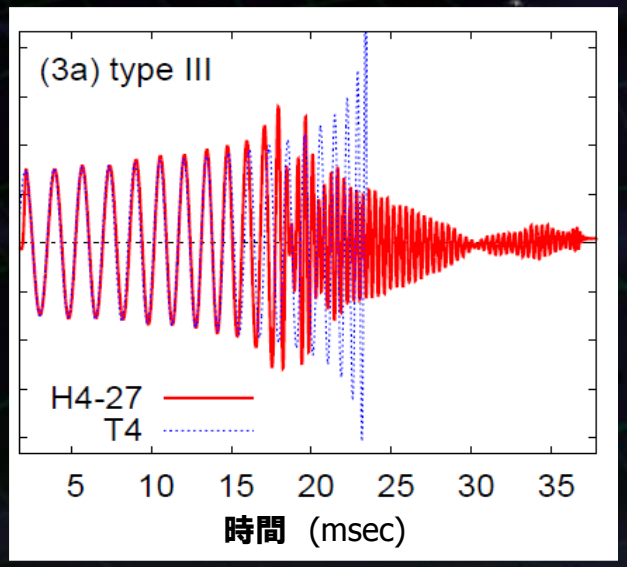
Type Ⅰ
BHへ崩壊

Type Ⅱ
寿命 < 5ms
Short lived
BHへ崩壊

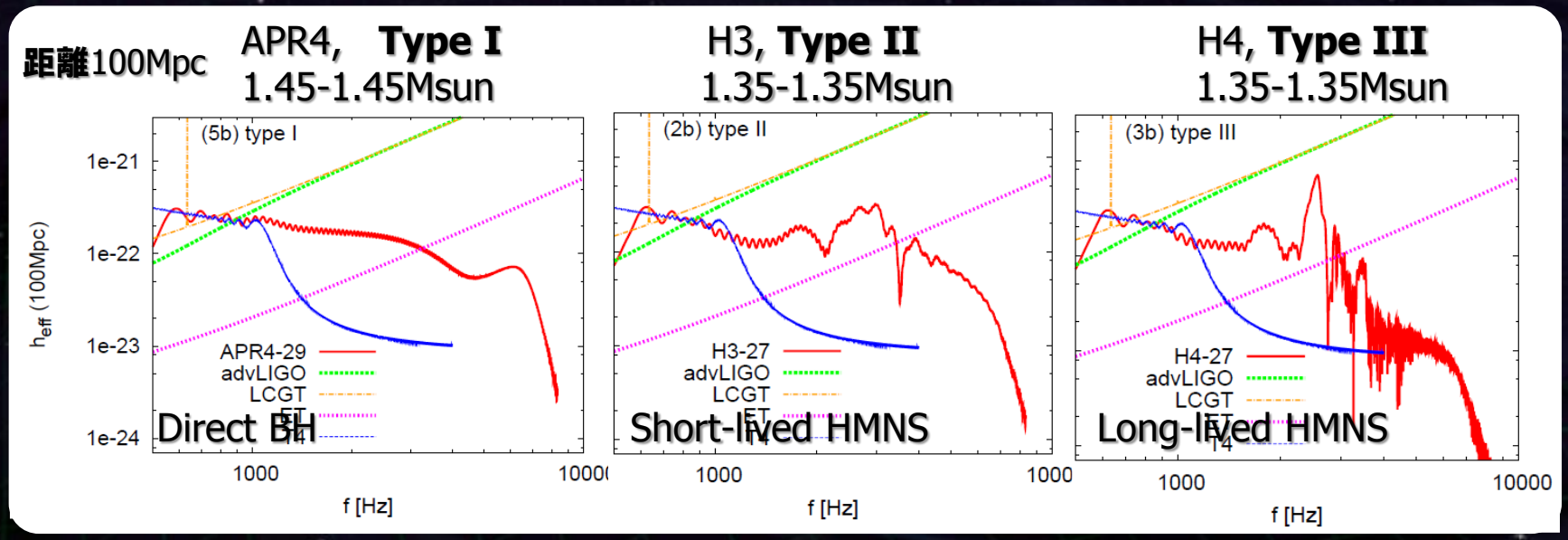
Type Ⅲ
寿命 > 5ms
Long lived
BHへ崩壊







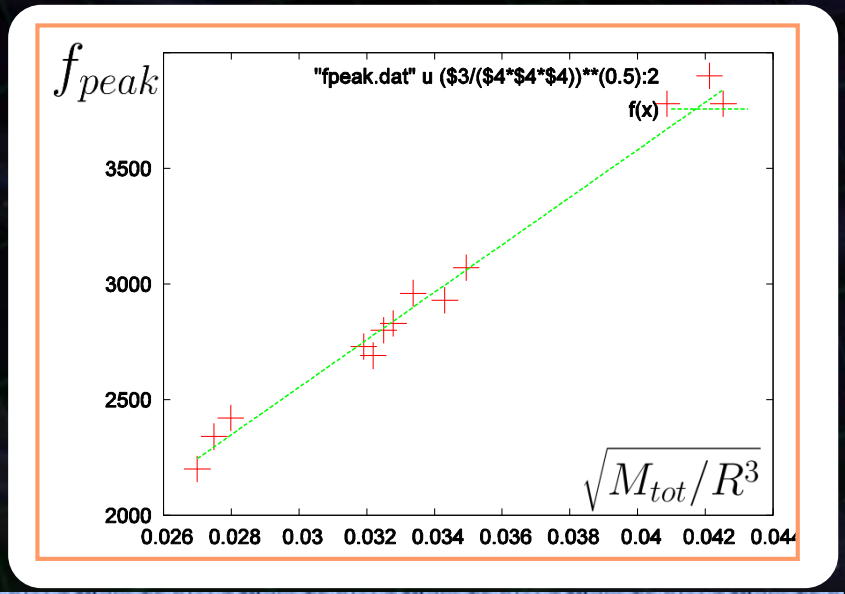
連星合体のスペクトル



HMNSの回転周波数にピーク
→ 中性子星の半径と相関

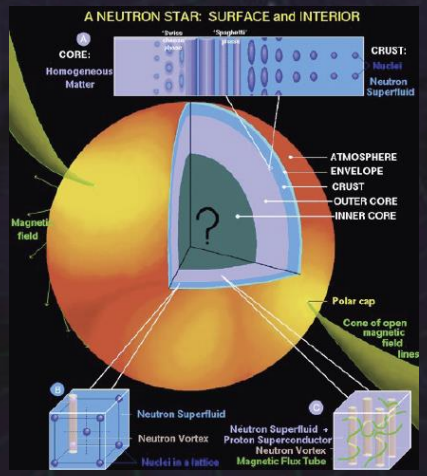
⇩

EOSに強い制限



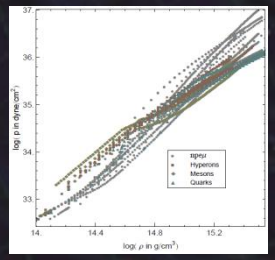
Hotokezaka+, PRD (2011)
Kyutoku+, PRD (2010), Bauswein+ (2011)

状態方程式と天文学

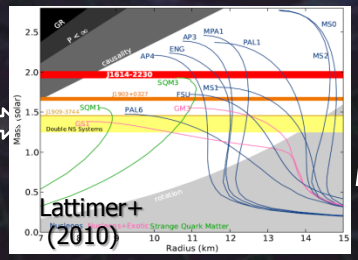


中性子星の状態方程式
(密度 2 ~ 15ρ_0)

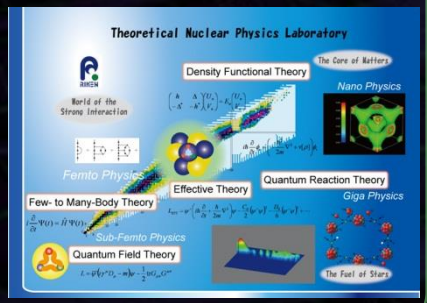
密度-圧力



中性子星の半径-質量

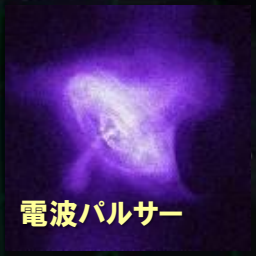


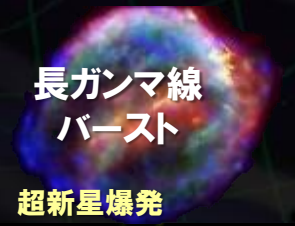
原子核理論
→ 地上実験が困難な
高密度物質の物理
(ハイペロンなど)



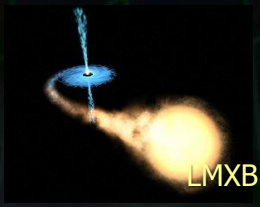
理研Web pageより

高エネルギー天体現象
→ 天文学, 極限状態の物理法則


電波パルサー


長ガンマ線バースト
超新星爆発

短ガンマ線バースト
連星合体

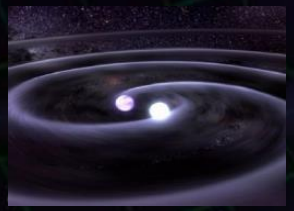

LMXB

軟ガンマ線リピーター
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

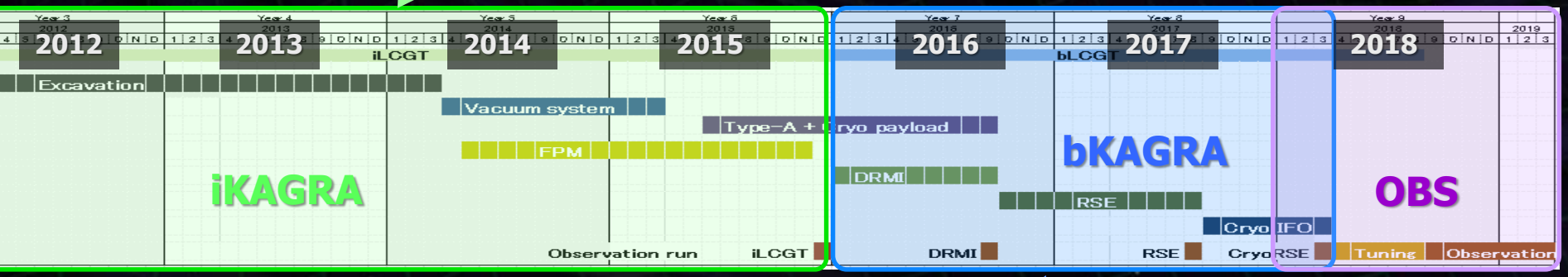
Messenger and Read, arXiv:1107.5725

望遠鏡建設中!!!

- KAGRAの現状 -

KAGRAスケジュール

- **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)
  3-km FPM 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.

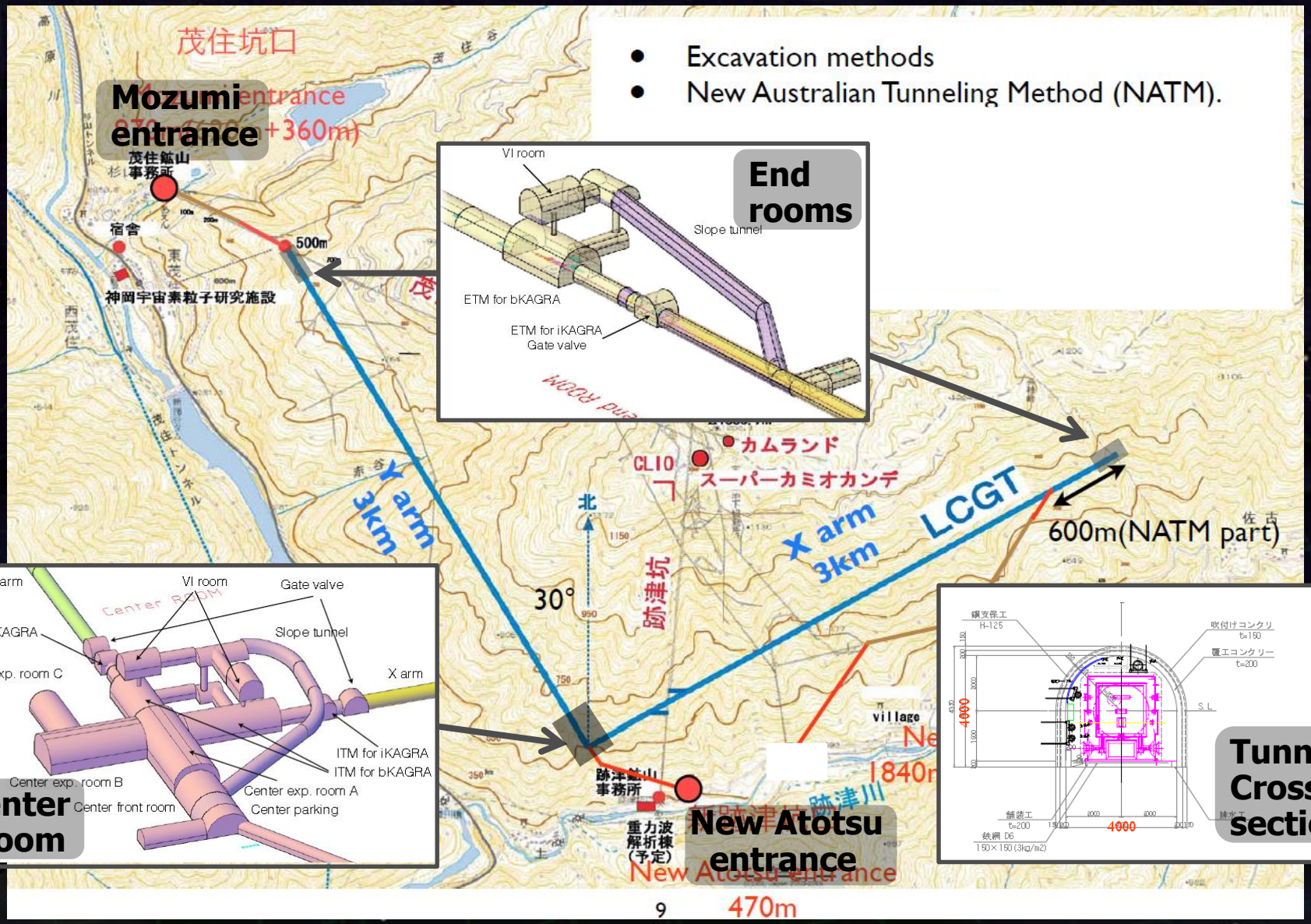
KAGRA サイト

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.

Map by Google

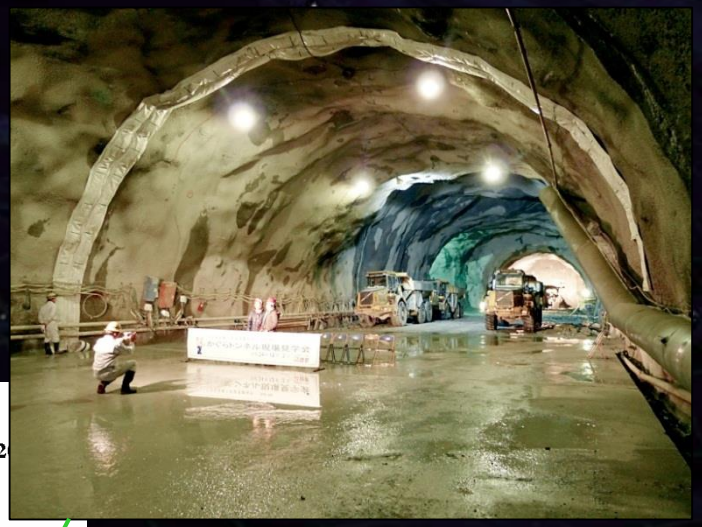
KAGRAトンネル設計

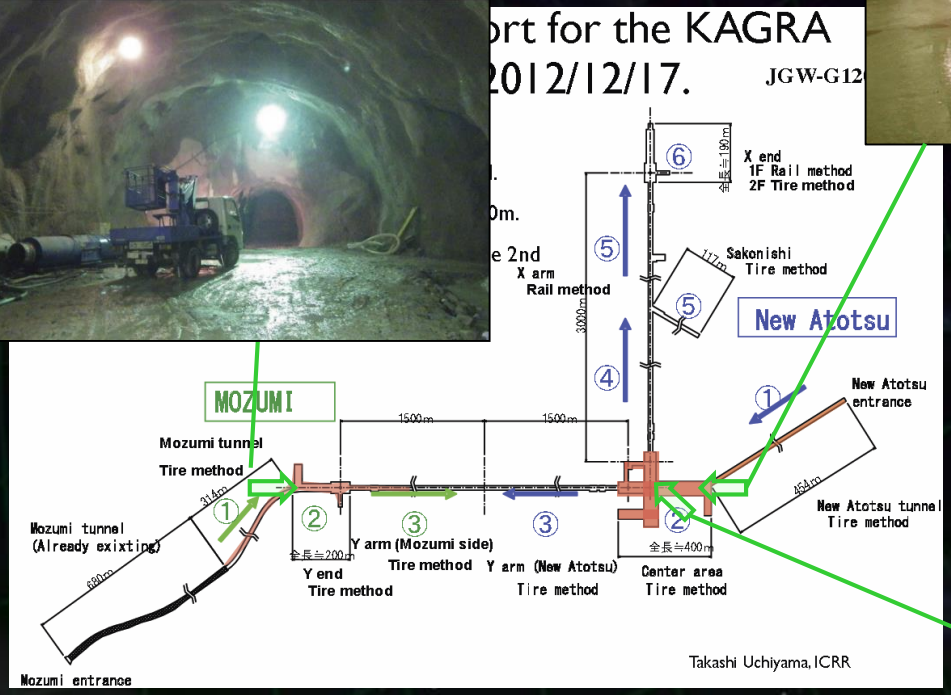


掘削工事の現状

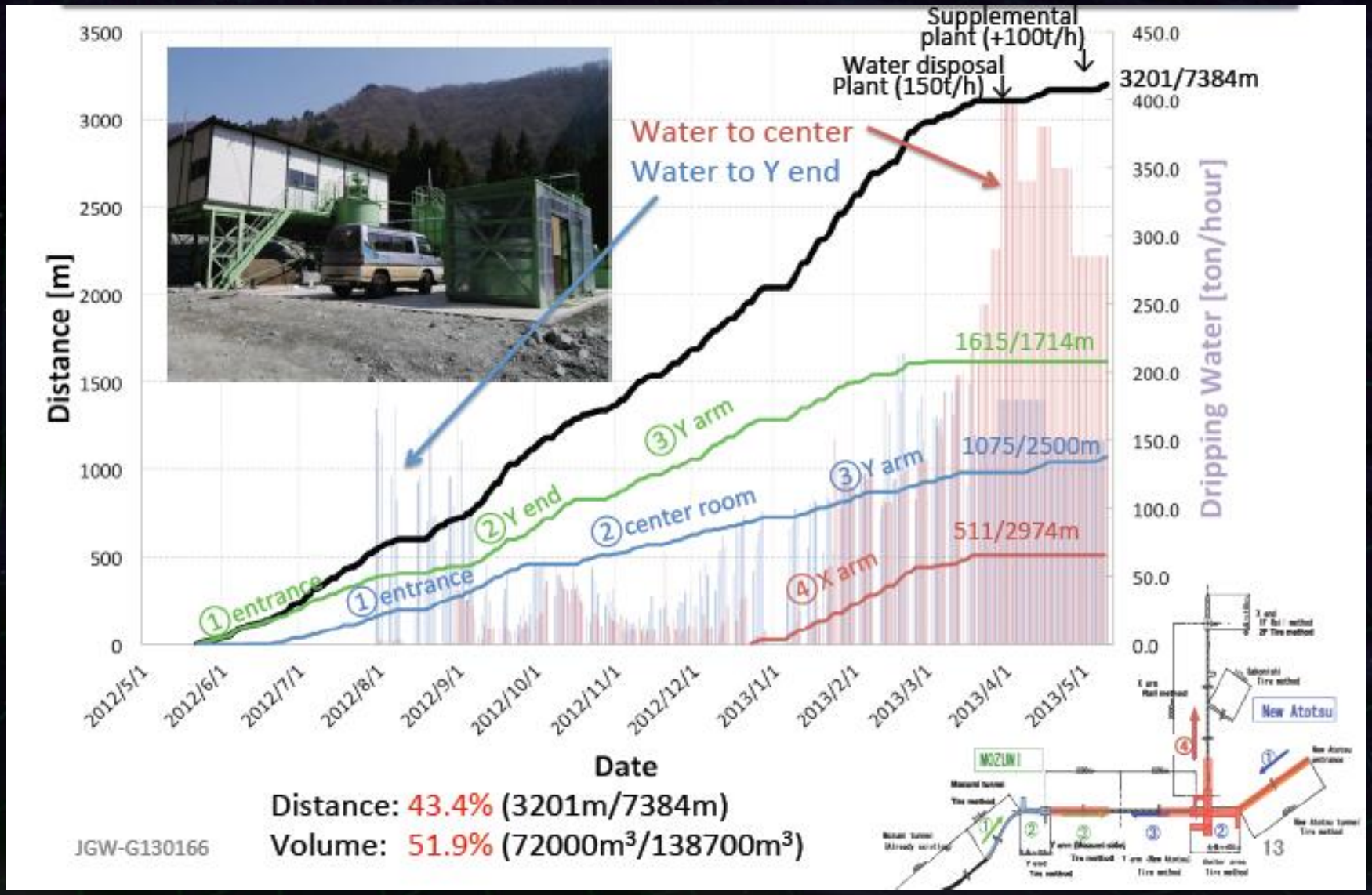
茂住口：
Y腕トンネル

新跡津口：センタールーム





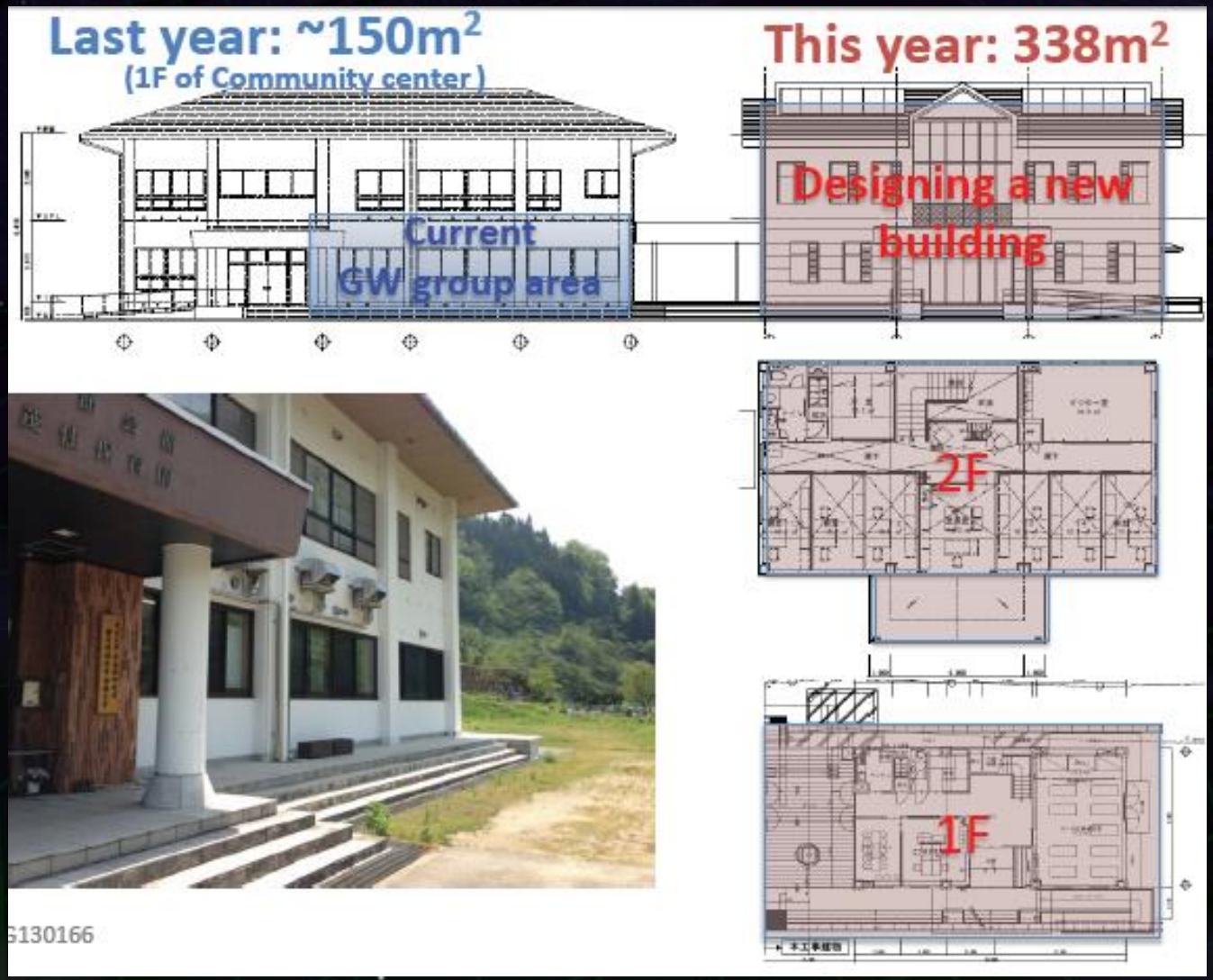
空洞掘削状況



O.Miyakawa , GWADW at Elba (May 2013)

現地の研究拠点

Office and Laboratory at Kamioka site



O.Miyakawa ,
GWADW at Elba
(May 2013)

真空ダクト

3km x 2本の真空ダクト：
12m, Φ800mm を478本接続. → 納品済.

Press to form a duct

Bellows for each duct

Presentation
By Y.Saito (KEK)

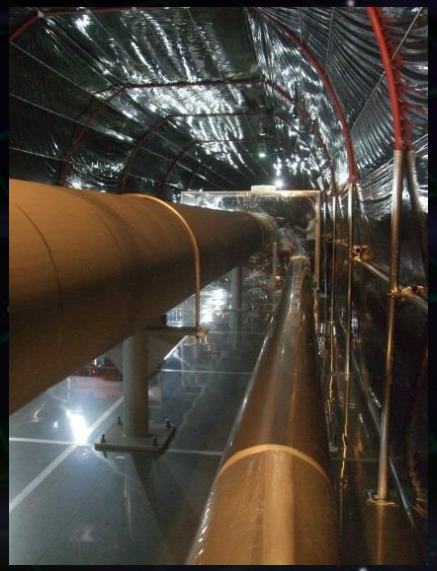
Transportation to Kamioka

Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka

Test at MIRAPRO Co. Noda

真空ダクト設置試験

KAGRA模擬トンネル・ビームライン設置試験場

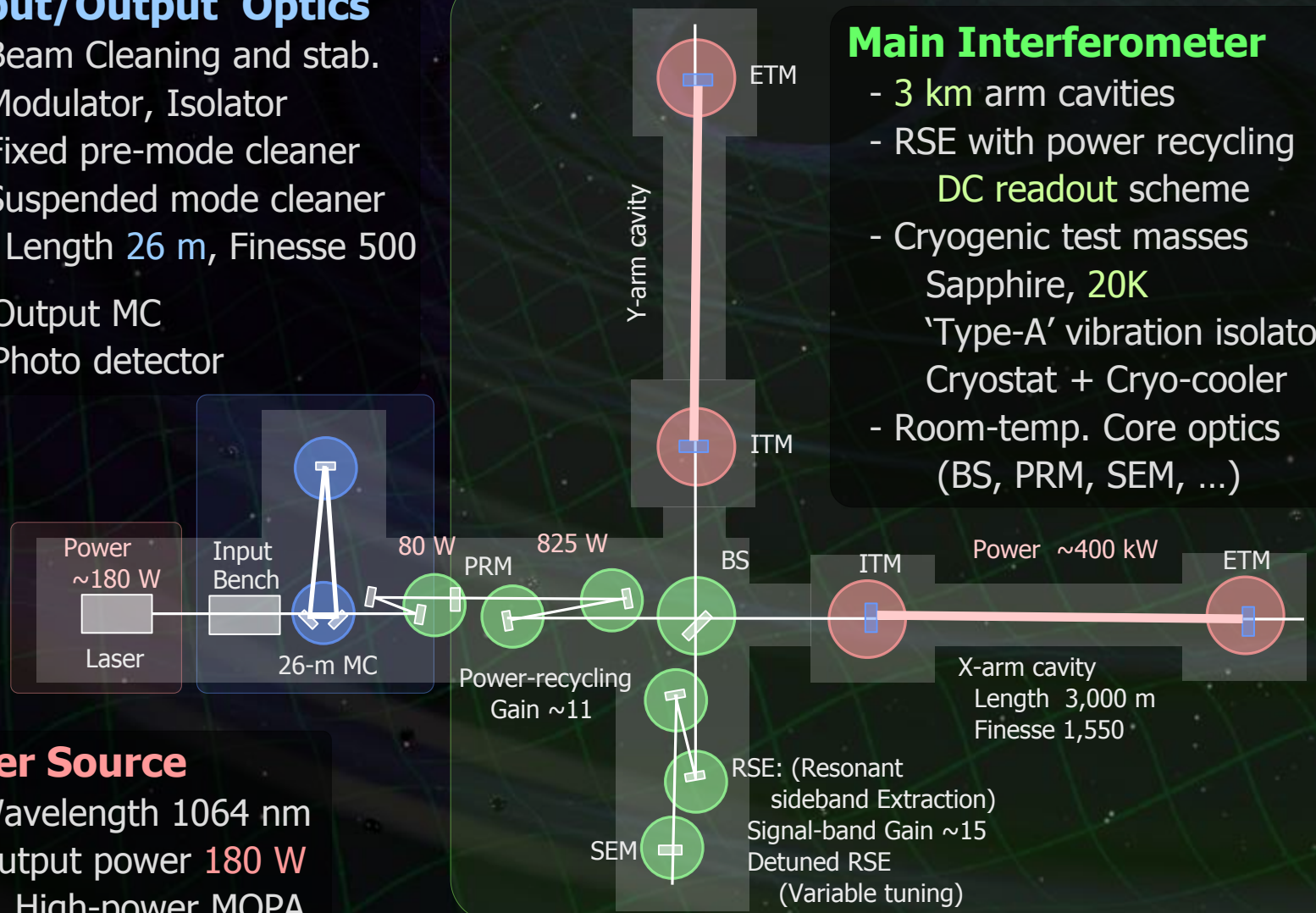


June 28, 2012, Photo by Kamiizumi and Iwasaki (ICRR)

KAGRA 干渉計構成

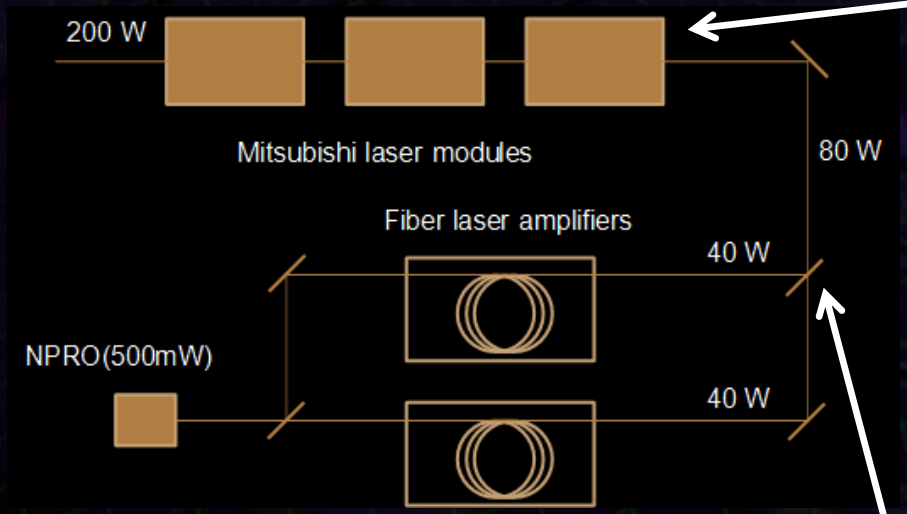
Input/Output Optics
- Beam Cleaning and stab.
- Modulator, Isolator
- Fixed pre-mode cleaner
- Suspended mode cleaner
  Length 26 m, Finesse 500
- Output MC
- Photo detector

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, ...)



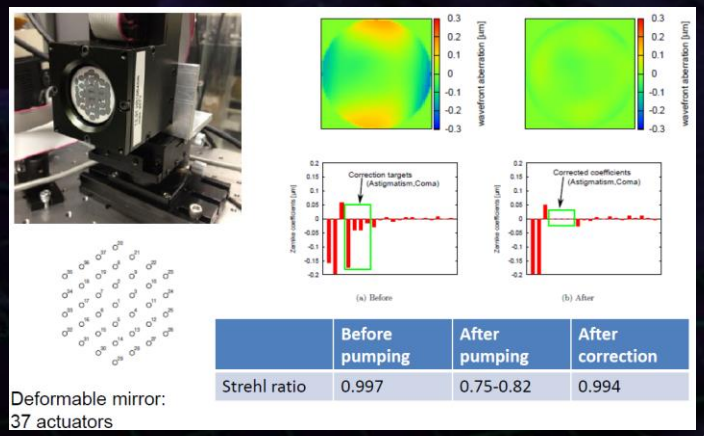
Laser Source
- Wavelength 1064 nm
- Output power 180 W
  High-power MOPA

高出力レーザー光源



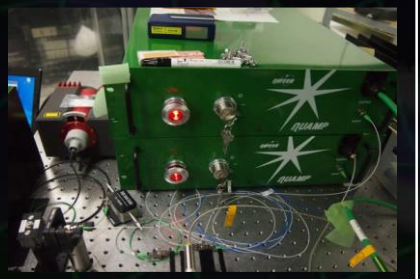
Wave-front correction

(for solid-state laser amplifier)



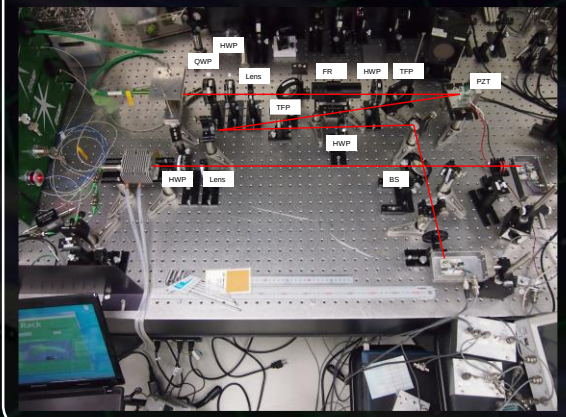
	Before pumping	After pumping	After correction
Strehl ratio	0.997	0.75-0.82	0.994

High-power Fiber amplifier

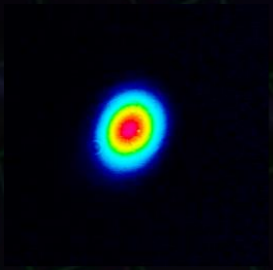


~40W / unit

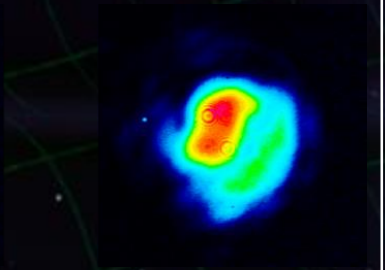
Coherent Addition



Bright port 78W



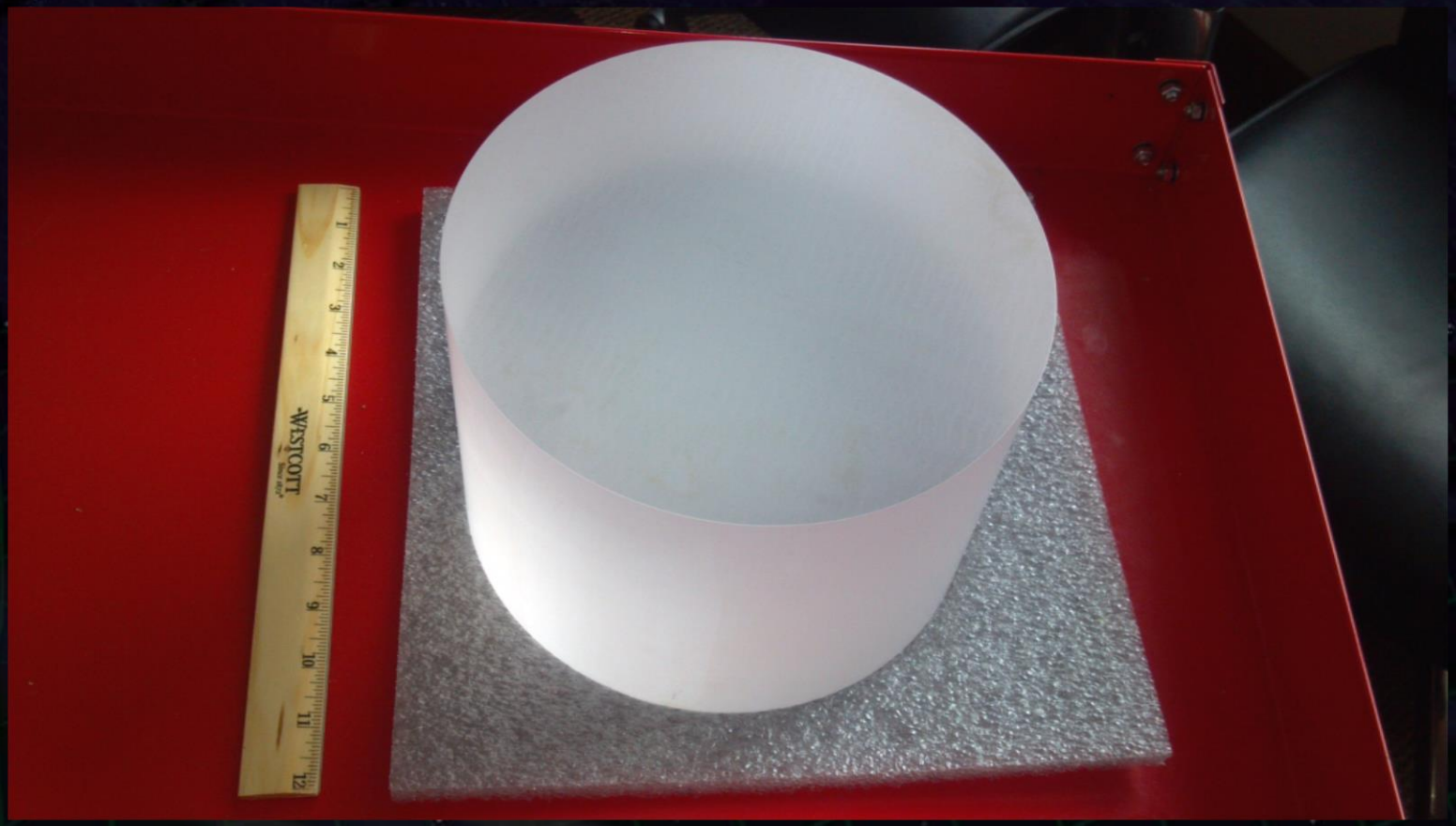
Dark port 4W



78W power by coherent addition of two 41-W beams.

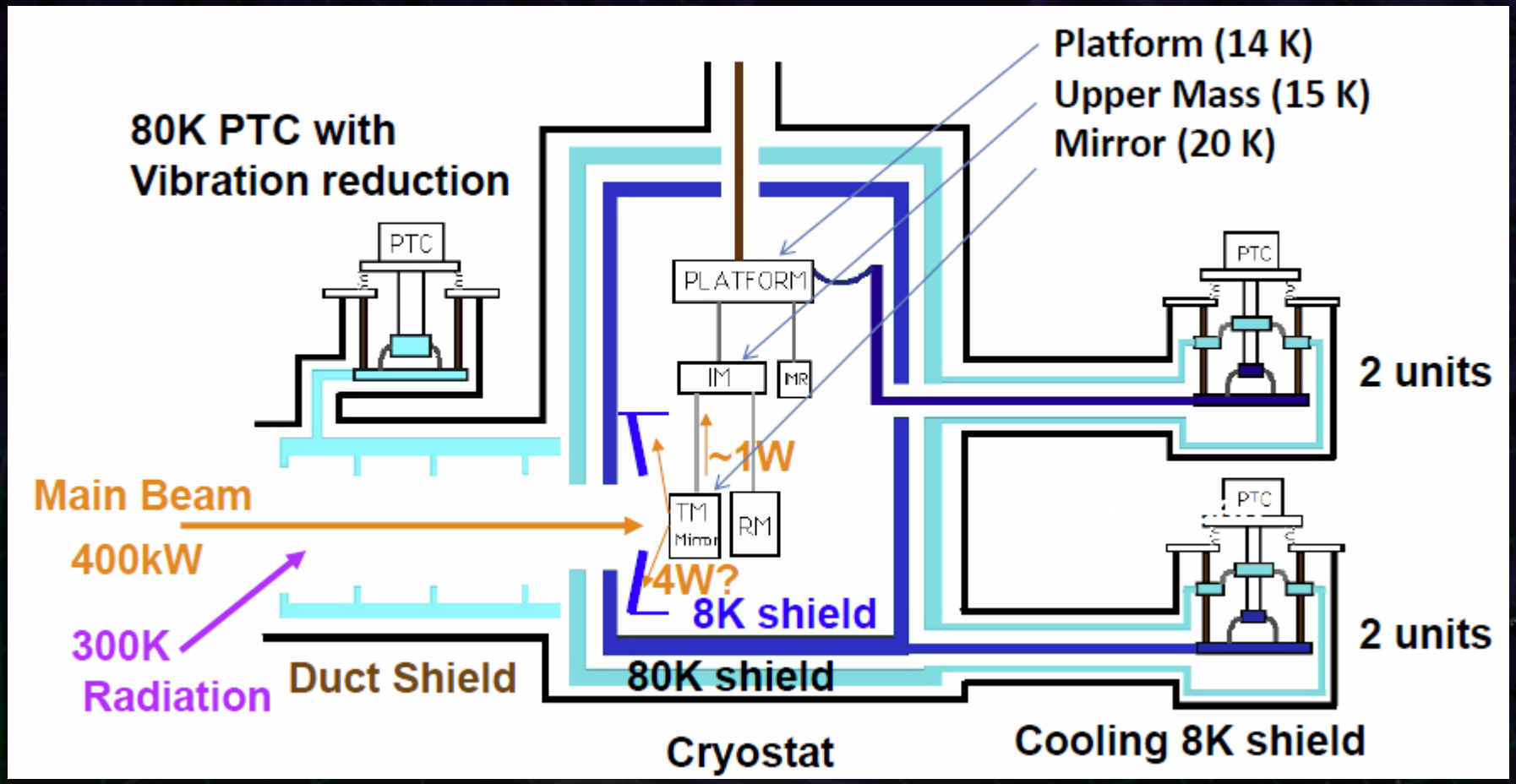
From presentation by N.Mio

サファイヤ鏡



2 Sapphire substrates were delivered
(Φ220mm, t 150mm, c-axis)

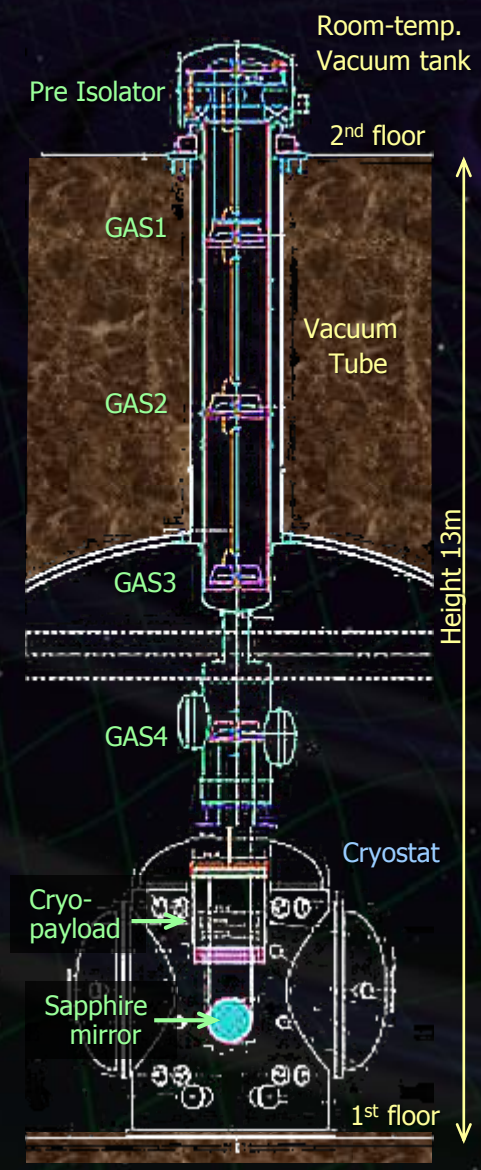
鏡冷却システム

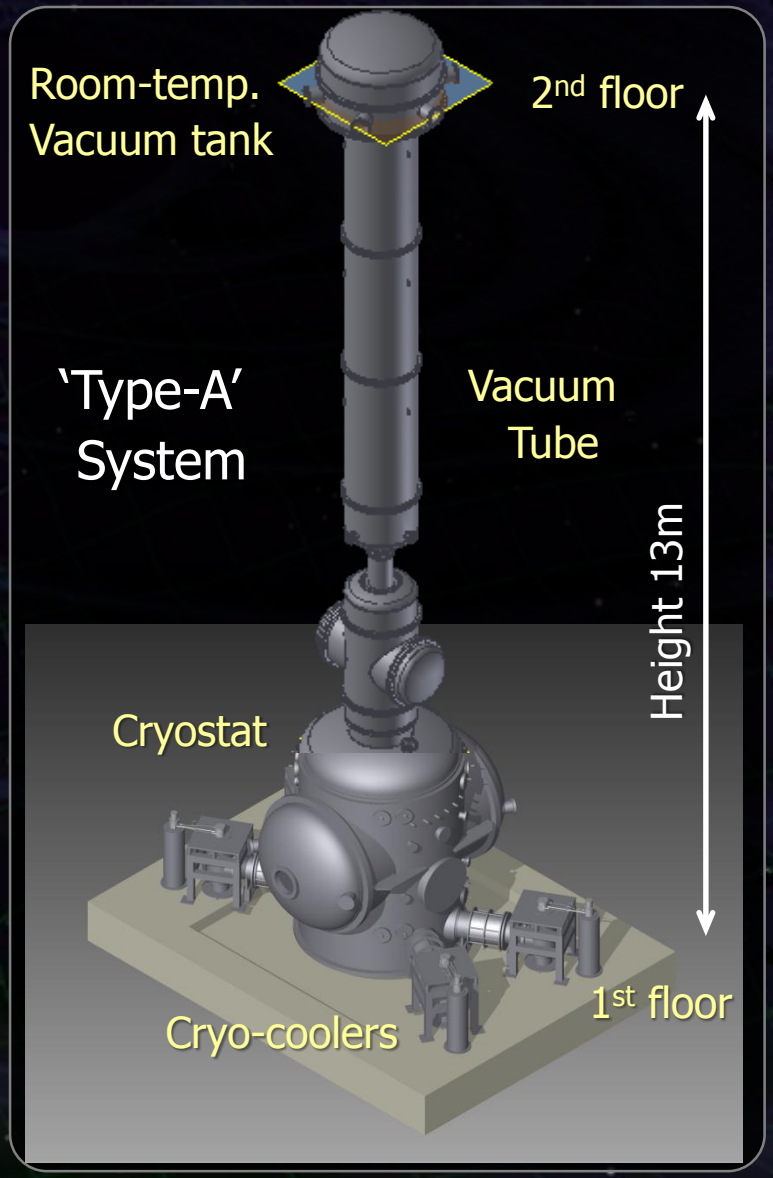

Platform (14 K)
Upper Mass (15 K)
Mirror (20 K)
80K PTC with
Vibration reduction
PTC
PLATFORM
IM
MR
~1W
TM
Mirror
RM
4W?
8K shield
PTC
2 units
PTC
2 units
Main Beam
400kW
300K
Radiation
Duct Shield
80K shield
Cryostat
Cooling 8K shield

低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.
Filter chain

Cryogenic
Payload





クライオスタットの製作

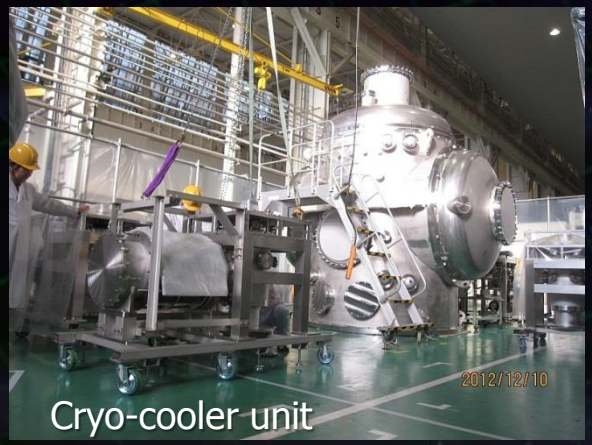
- クライオスタット用真空槽 (4台) 完成
  → ラディエーションシールドのインストール
  冷凍機ユニット接続 → 冷却試験.

Cryostat #1 in preparation for installation of radiation shield.

Cryostat #2 under leak test.

Toshiba Keihin Factory (Oct 31, 2012)

Inside the Rad. Shield

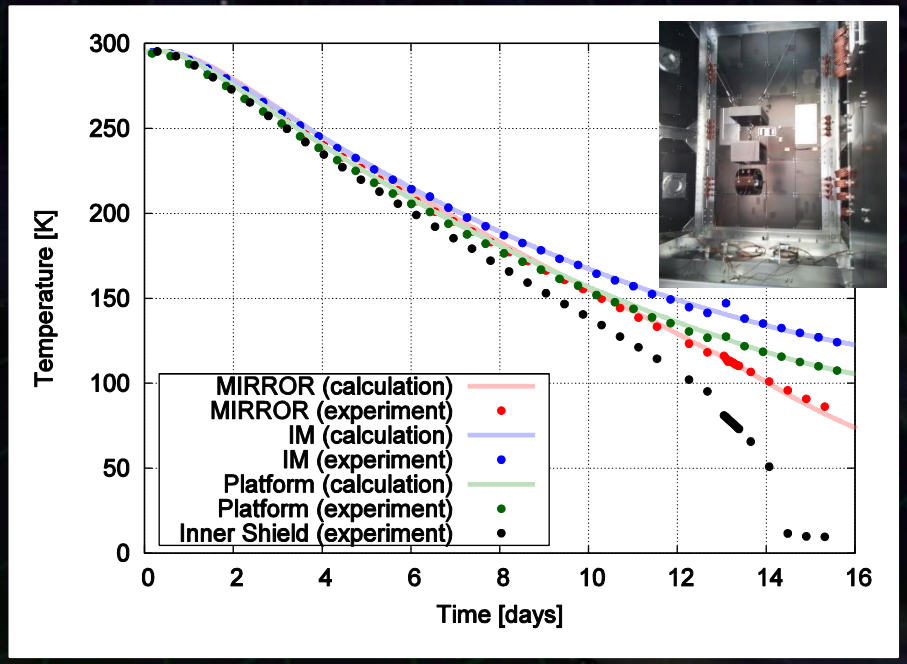


Cryo-cooler unit

クライオスタット冷却試験

約2週間で冷却できることを確認.
ダミーペイロード冷却試験も実施.

⇨ 倉庫に搬入 (2013.7)



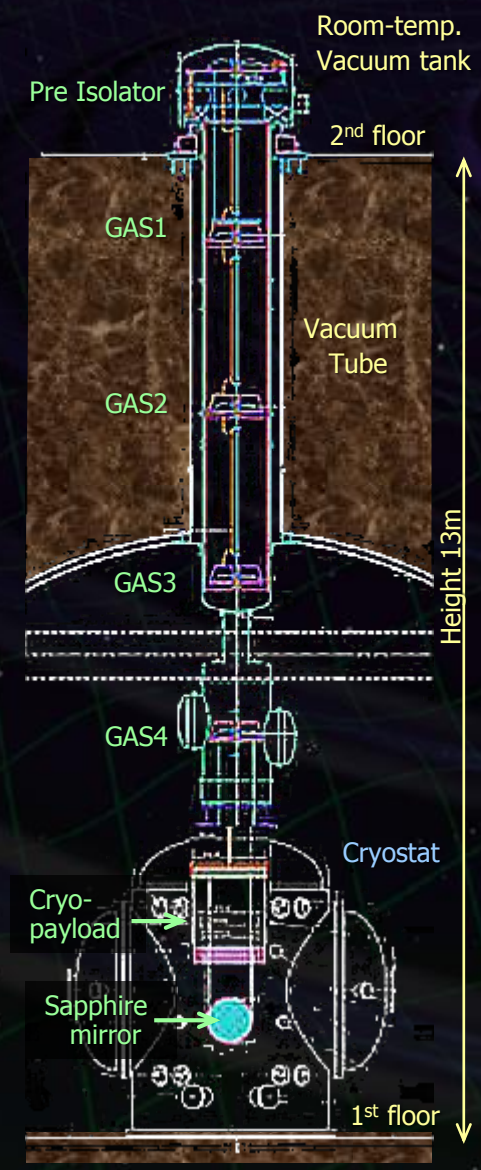
Presentation by N.Kimura at Amaldi10 (2013.7)

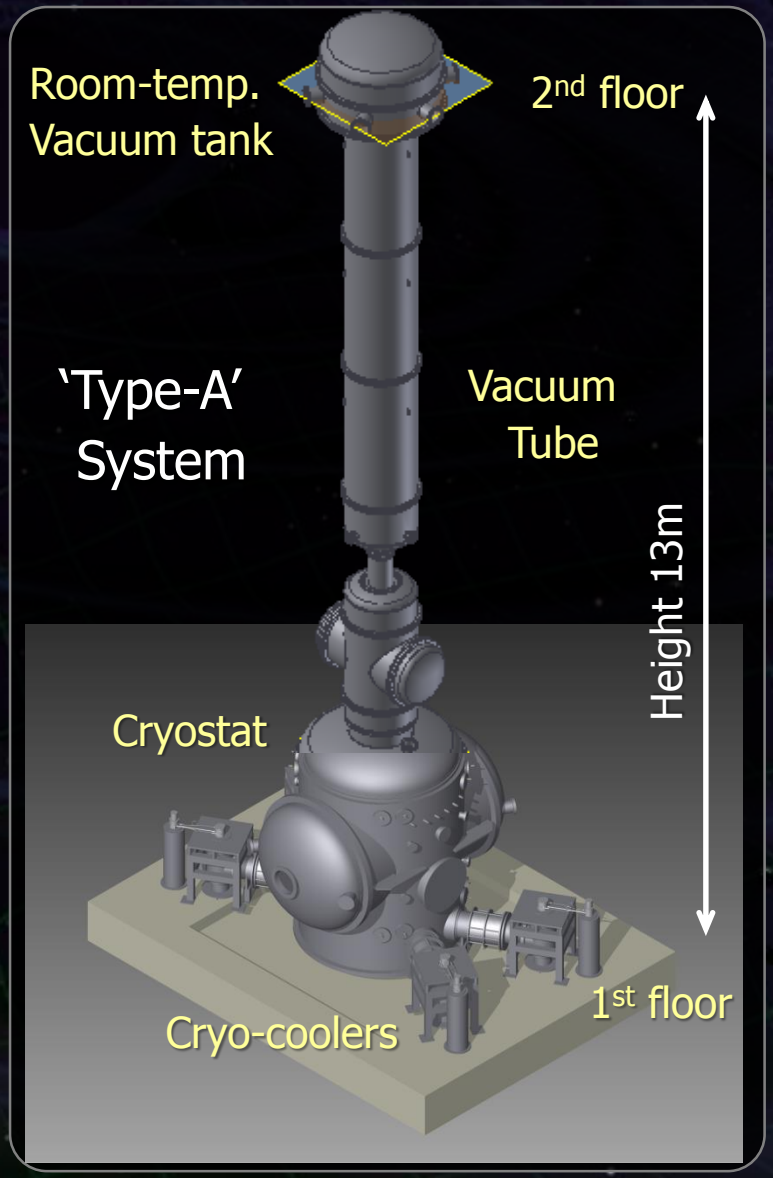
Photo by C.Tokoku

低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.
Filter chain

Cryogenic
Payload



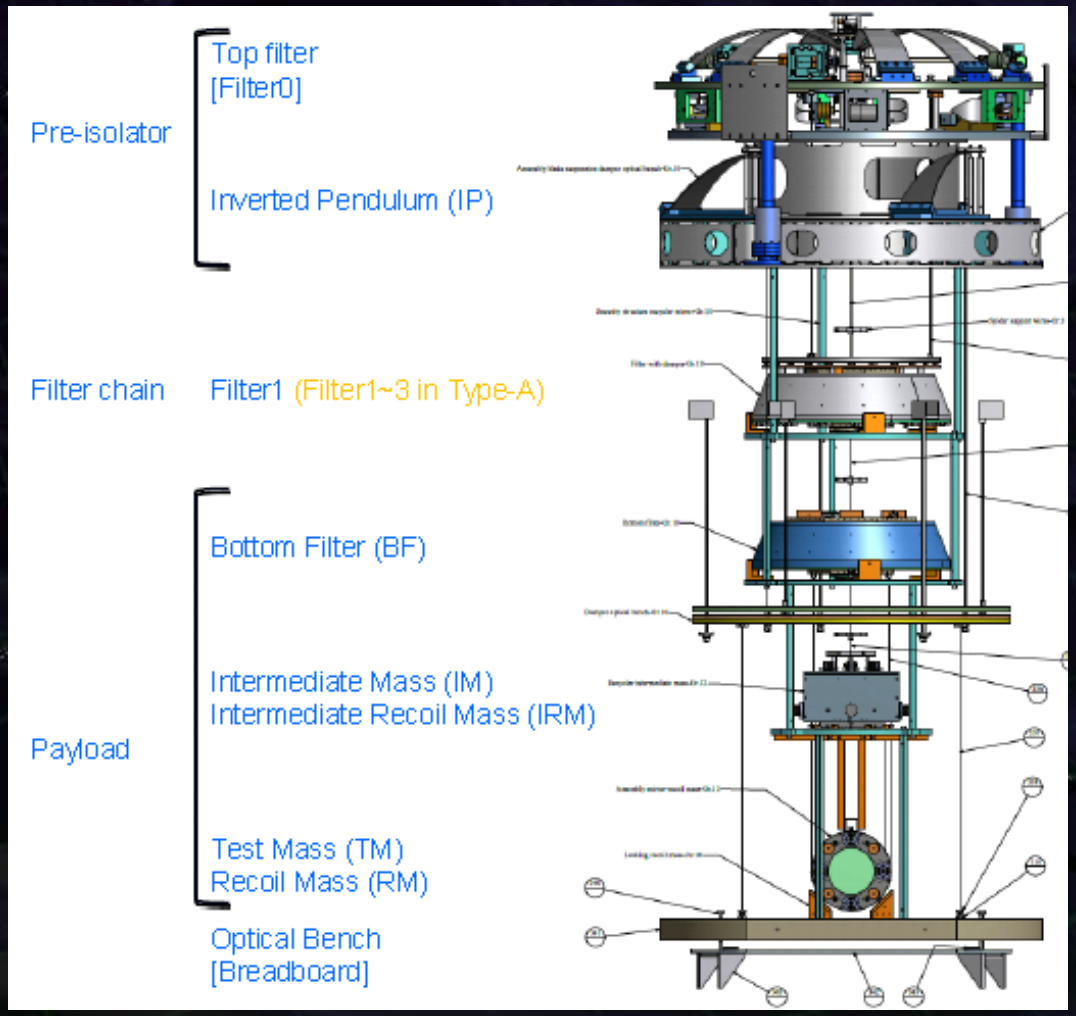


防振装置構成

SAS (Seismic Attenuation System)

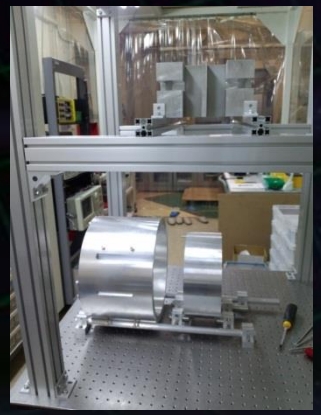
- Multi-stage, low-freq. isolator for silica room-temp. optics (BS, PRC, and SEC).
- Full system test at TAMA300 facility in this year.

R. Takahashi at External Review (April 2012)



防振装置

Pre-Isolator Prototype test (Kashiwa)



まとめ

まとめ

KAGRA

KAGRA： プロジェクト進行中

- 観測可能距離 ~200Mpc → 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

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