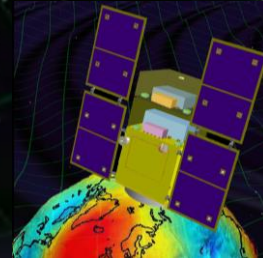
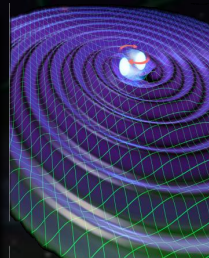
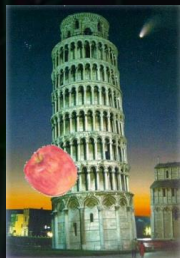


# 重力波望遠鏡KAGRA が切り拓く天文学

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-)

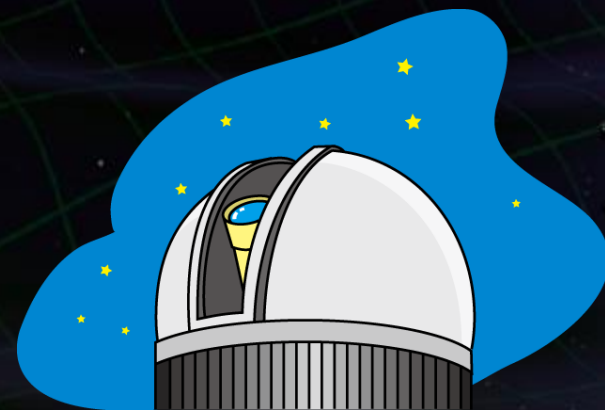


重力波天文学の創成

- **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???

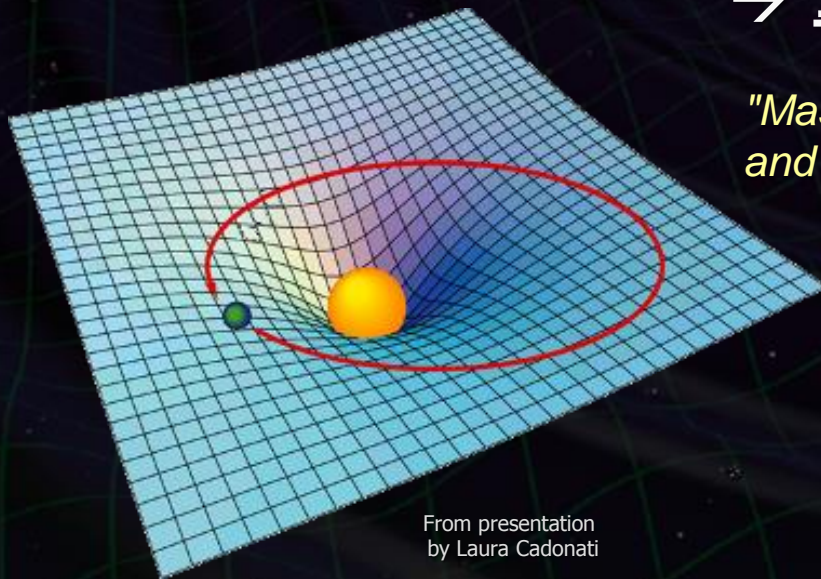
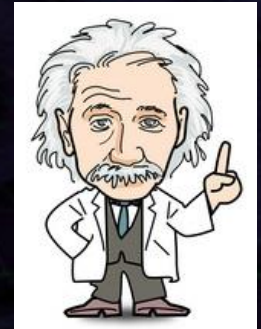




## 一般相対性理論

→ 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."*



From presentation  
by Laura Cadonati

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

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**



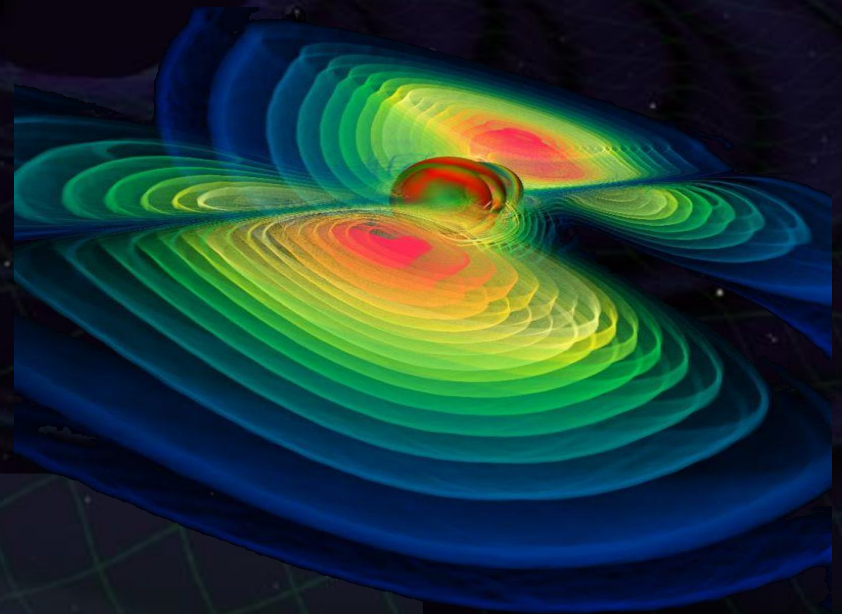
## 重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力

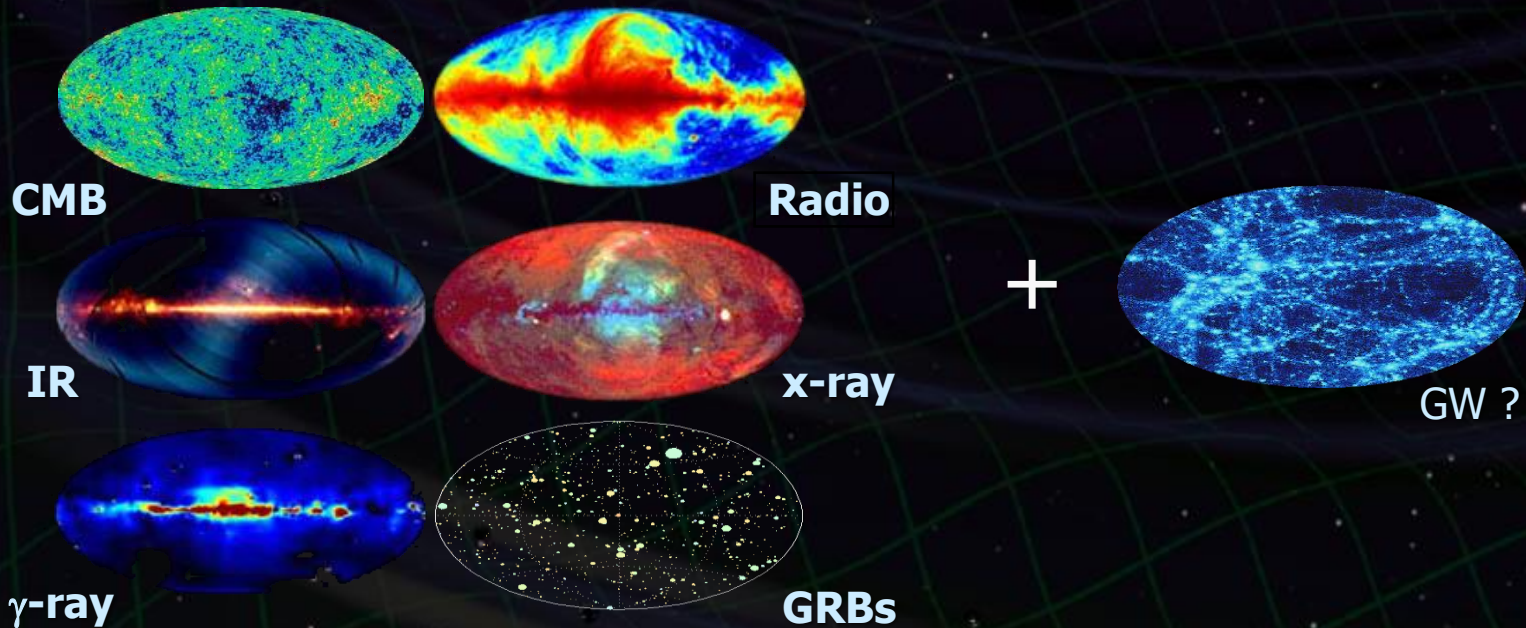


## 宇宙を観測する新しい手段

- ・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)

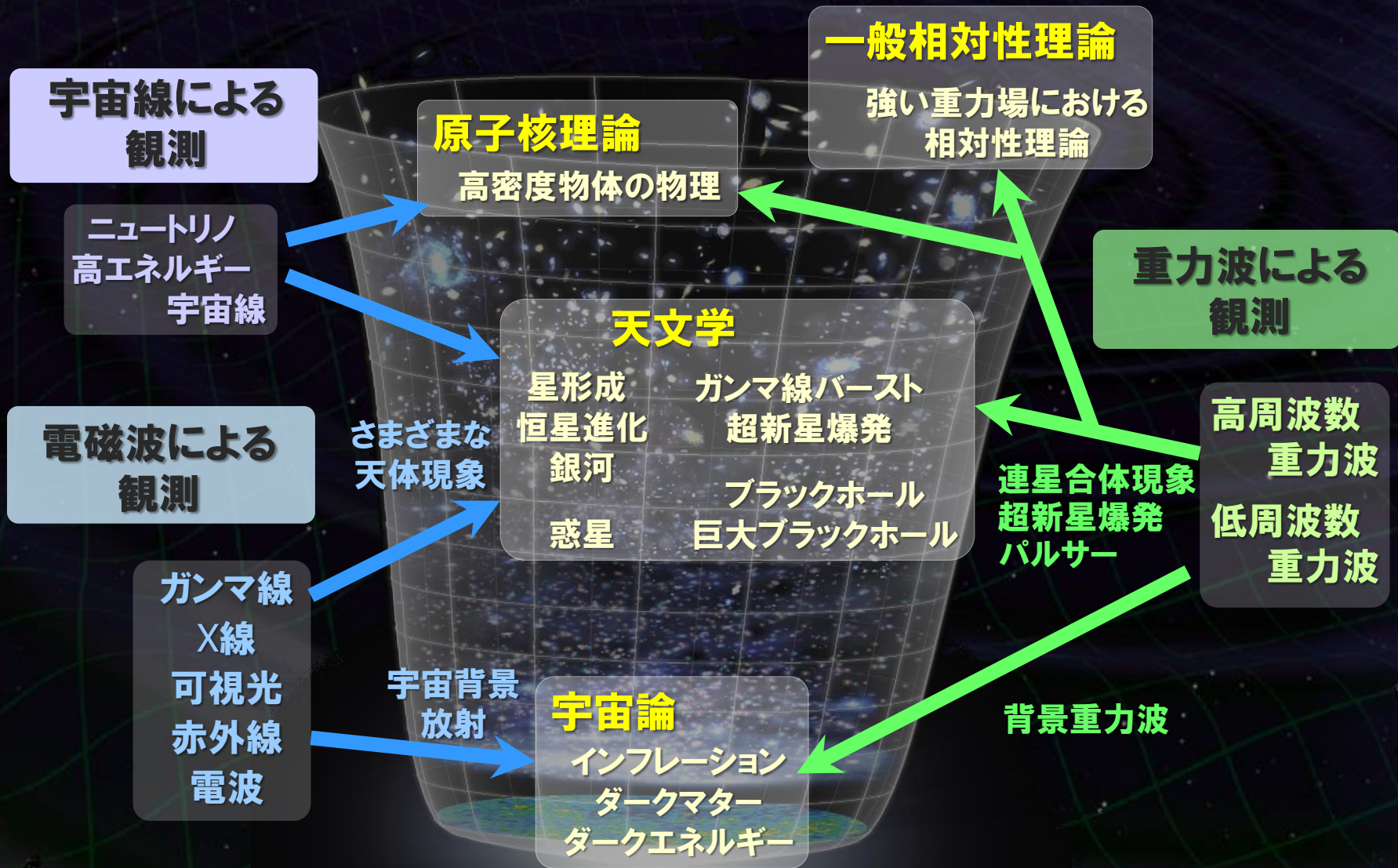


宇宙を観測する新しい手段 → 新しい発見!!!





# 重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team



# 宇宙の誕生と進化





…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

- 光速で伝播する  
電磁場の変動



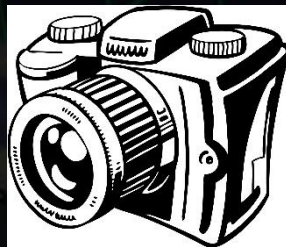
J.C. Maxwell

- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱



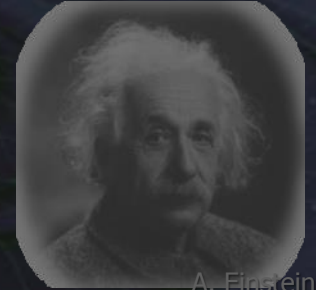
波源の各所から放射

→ 画像として観測.



## 重力波

- 光速で伝播する  
時空の歪み



A. Einstein

- 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

## 重力波の効果

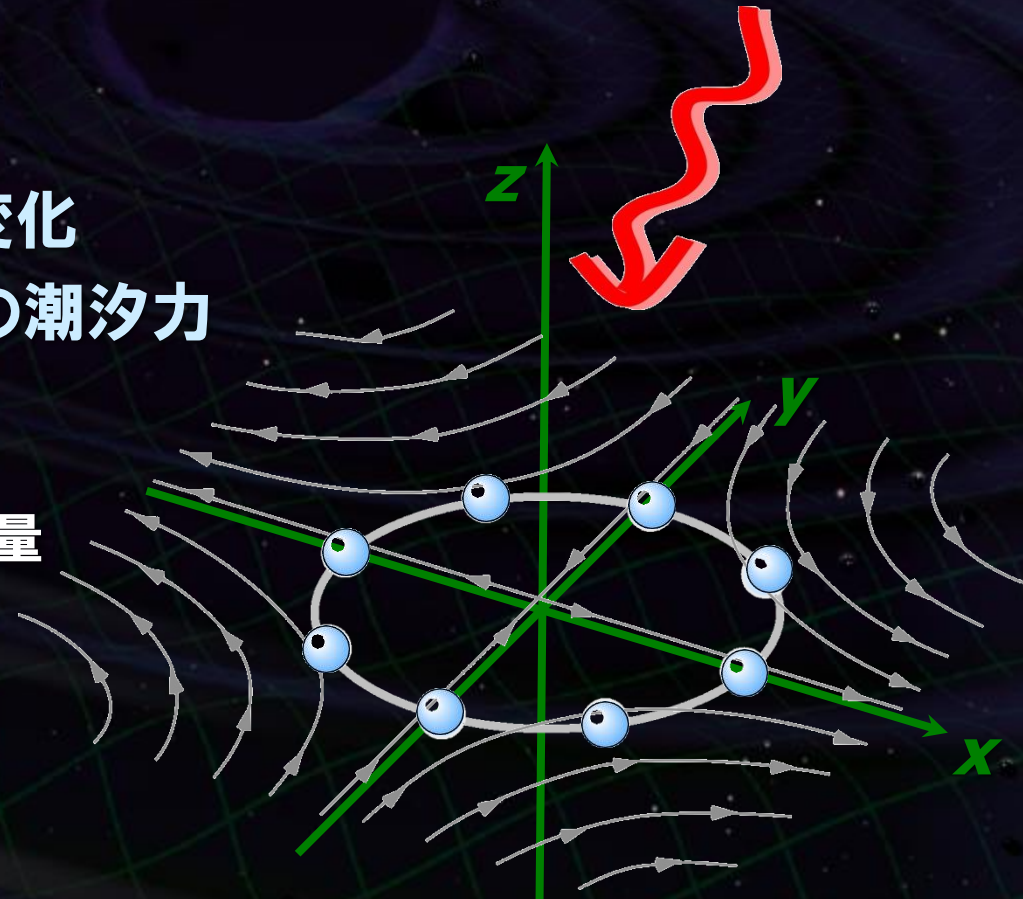
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅  $h$  : 無次元の歪み量

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

$\delta L$  : 距離変動

$L$  : 2点間の距離



$h = 10^{-21} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が $10^{-21}\text{m}$ 伸縮.



# レーザー干渉計型重力波検出器

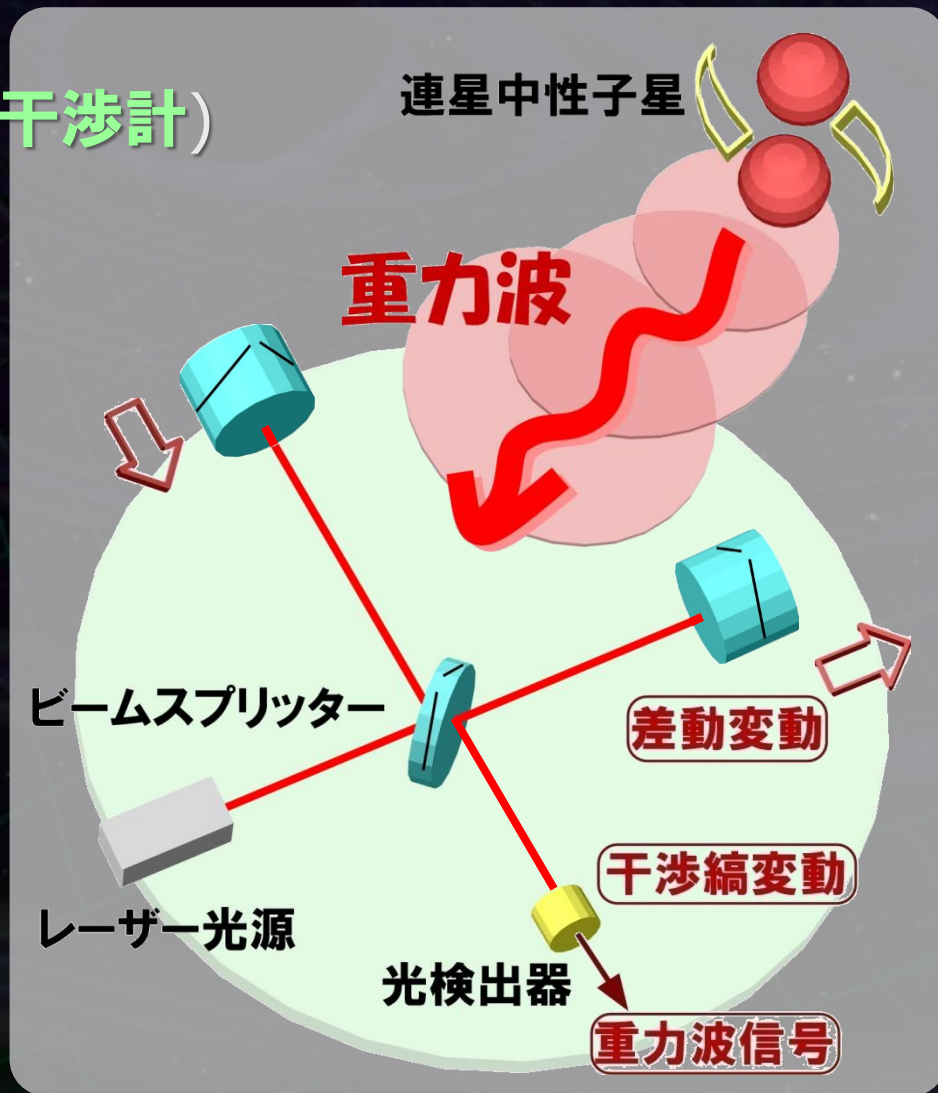
## レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- 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



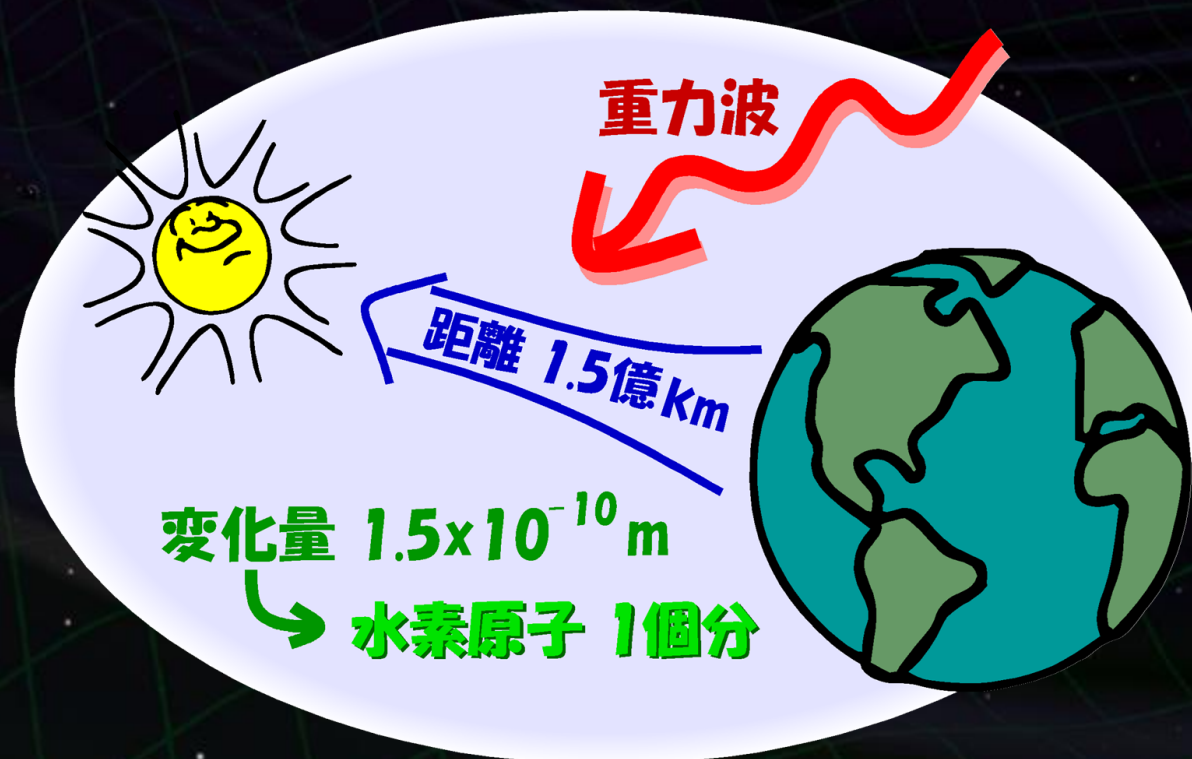
## (例) 地球-太陽間の距離変動

距離  $1.5 \times 10^{11}$  m

重力波振幅  $10^{-21}$



$1.5 \times 10^{-10}$  m の距離変動





# 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

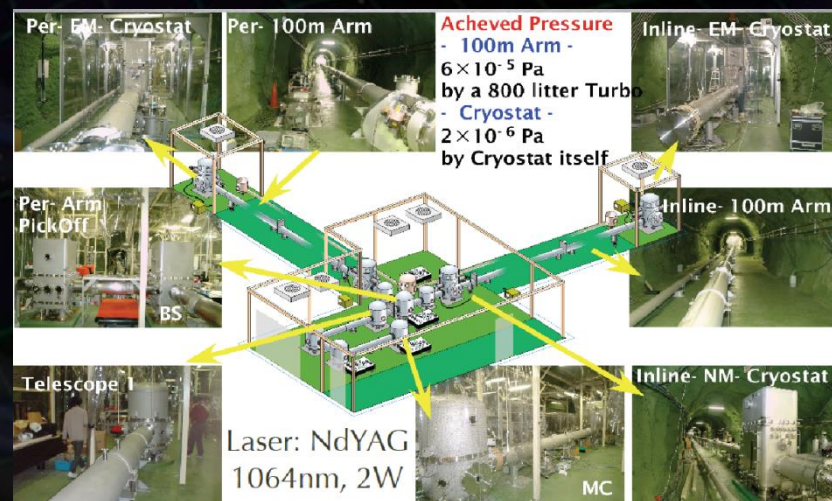
低温・地下レーザー干渉計

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)





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)  $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



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



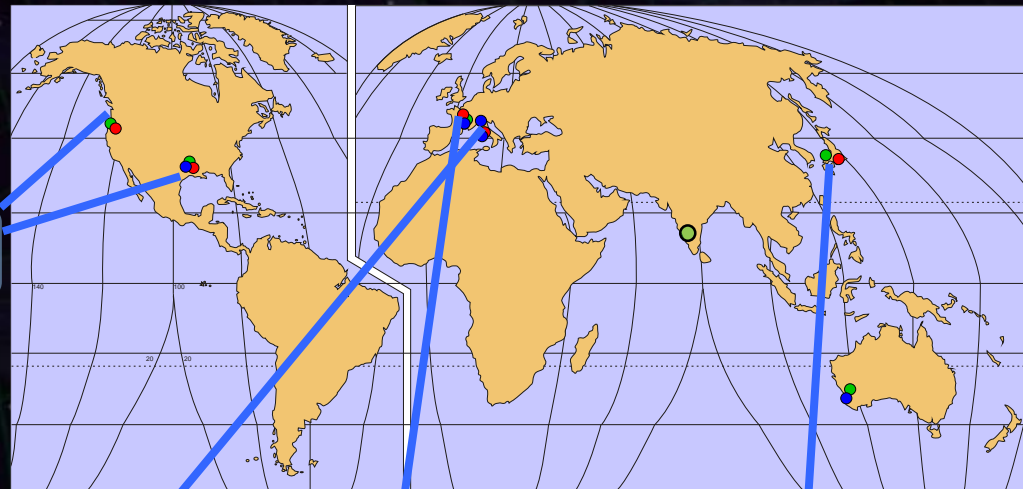
# 第2世代 重力波望遠鏡

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, 位置, 物理情報, ...)



aLIGO (USA)  
4km x 2 (or3)



LIGO-Australia  
in proposal

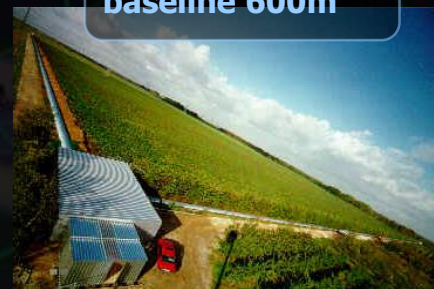


LIGO-India  
in proposal

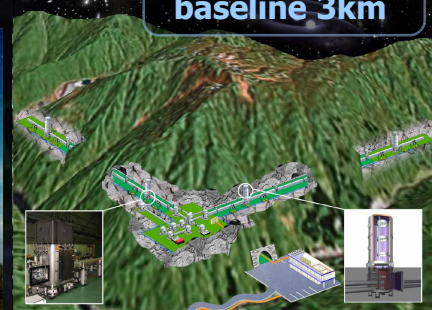
Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



KAGRA (JPN)  
baseline 3km



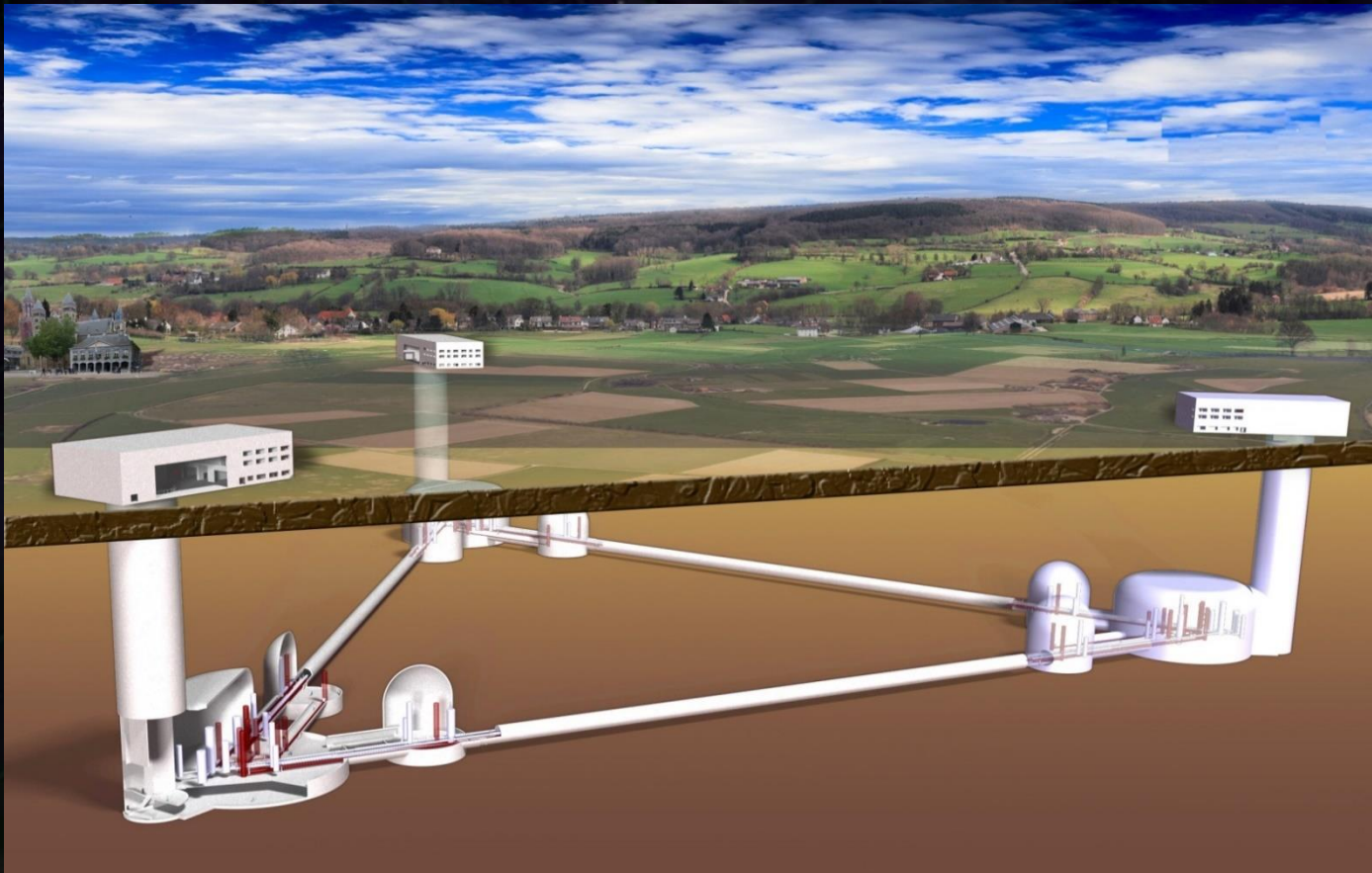


# 第3世代 重力波望遠鏡

## 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  $\sim 10\text{km}$ , 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 (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)

に愛称がつけました。

かぐら KAGRA

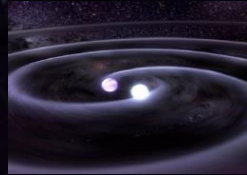
- かぐら (神楽) : 神に奉げる歌や踊り。
- Acronymではないが、  
KA (Kamioka)  
+ GRA (Gravitational Wave Antenna)  
の意味合いもある。



# 重力波望遠鏡の高感度化

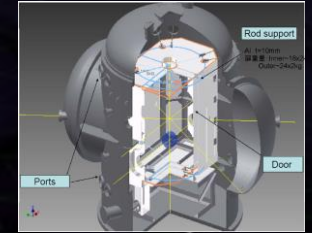
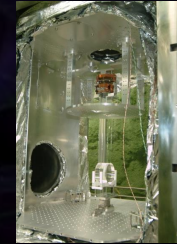
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



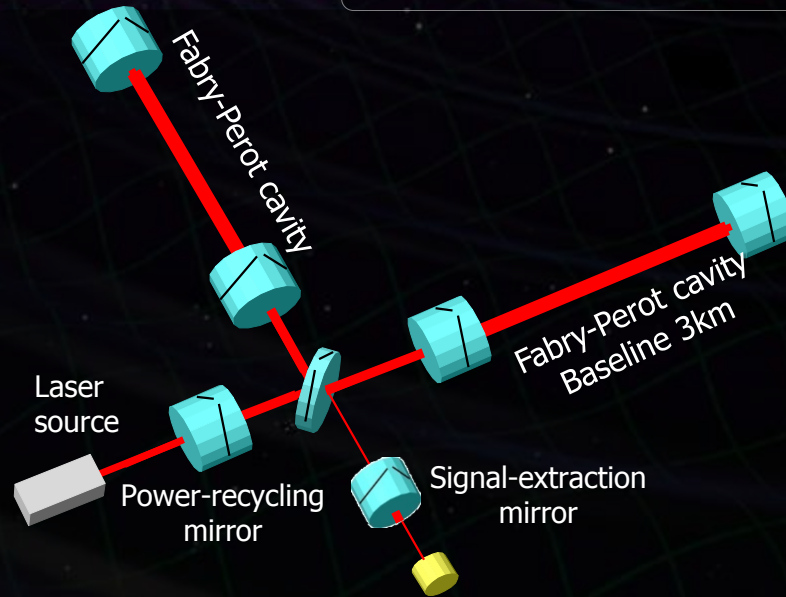
## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



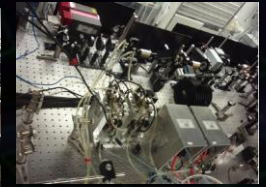
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



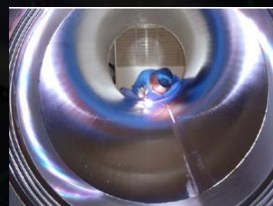
## ・光の量子雑音

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



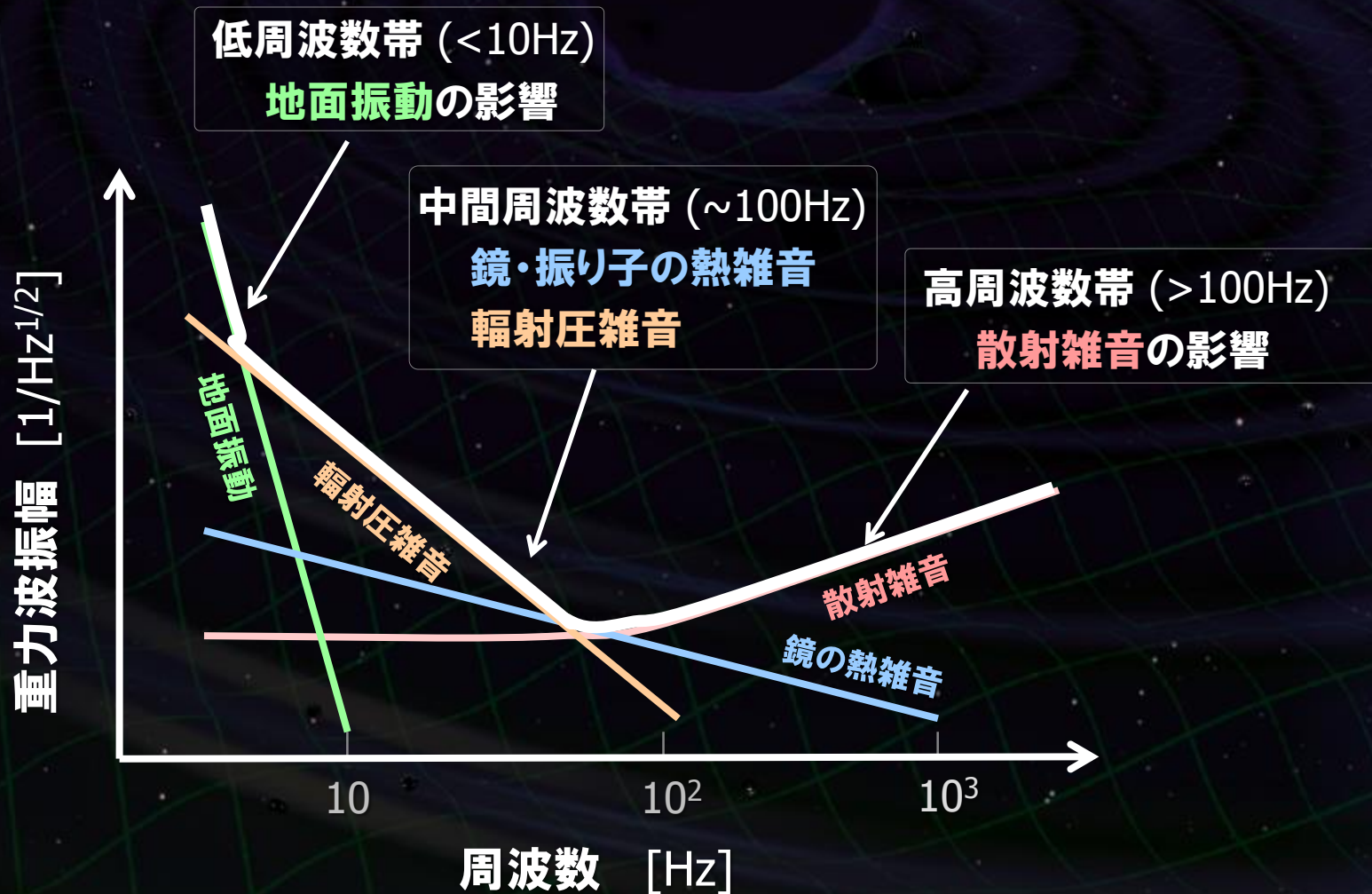
## ・長期・連続観測

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



## ・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

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 --- 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

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 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

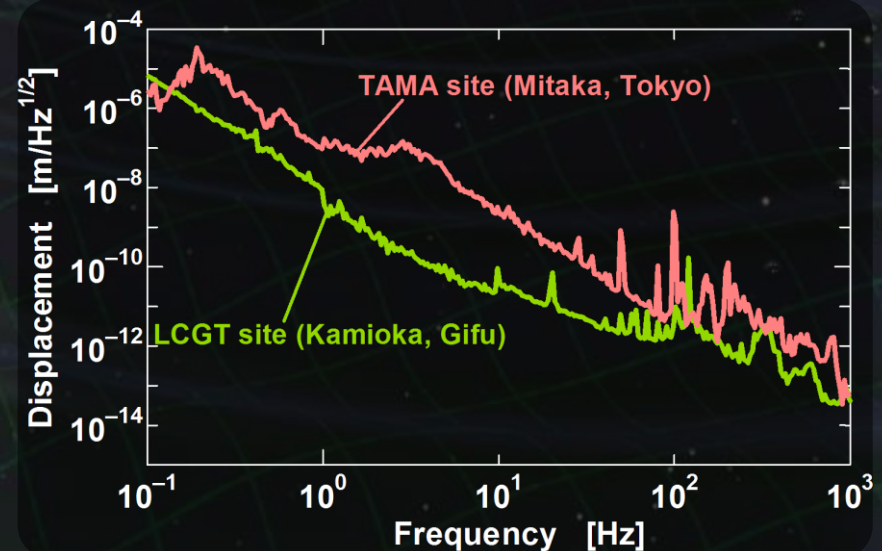
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.  
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

### 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.

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

(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.

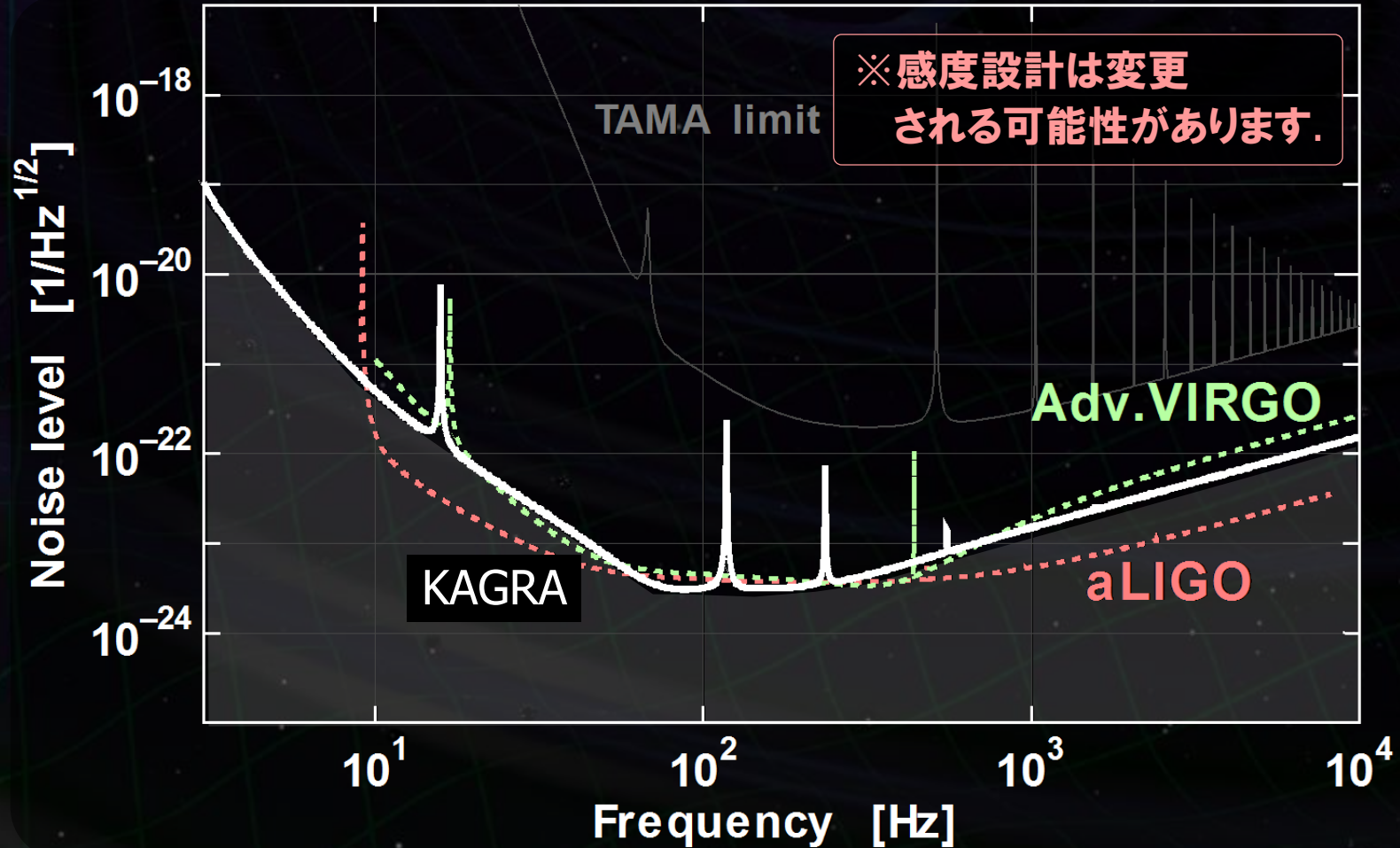


# KAGRAの感度限界

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

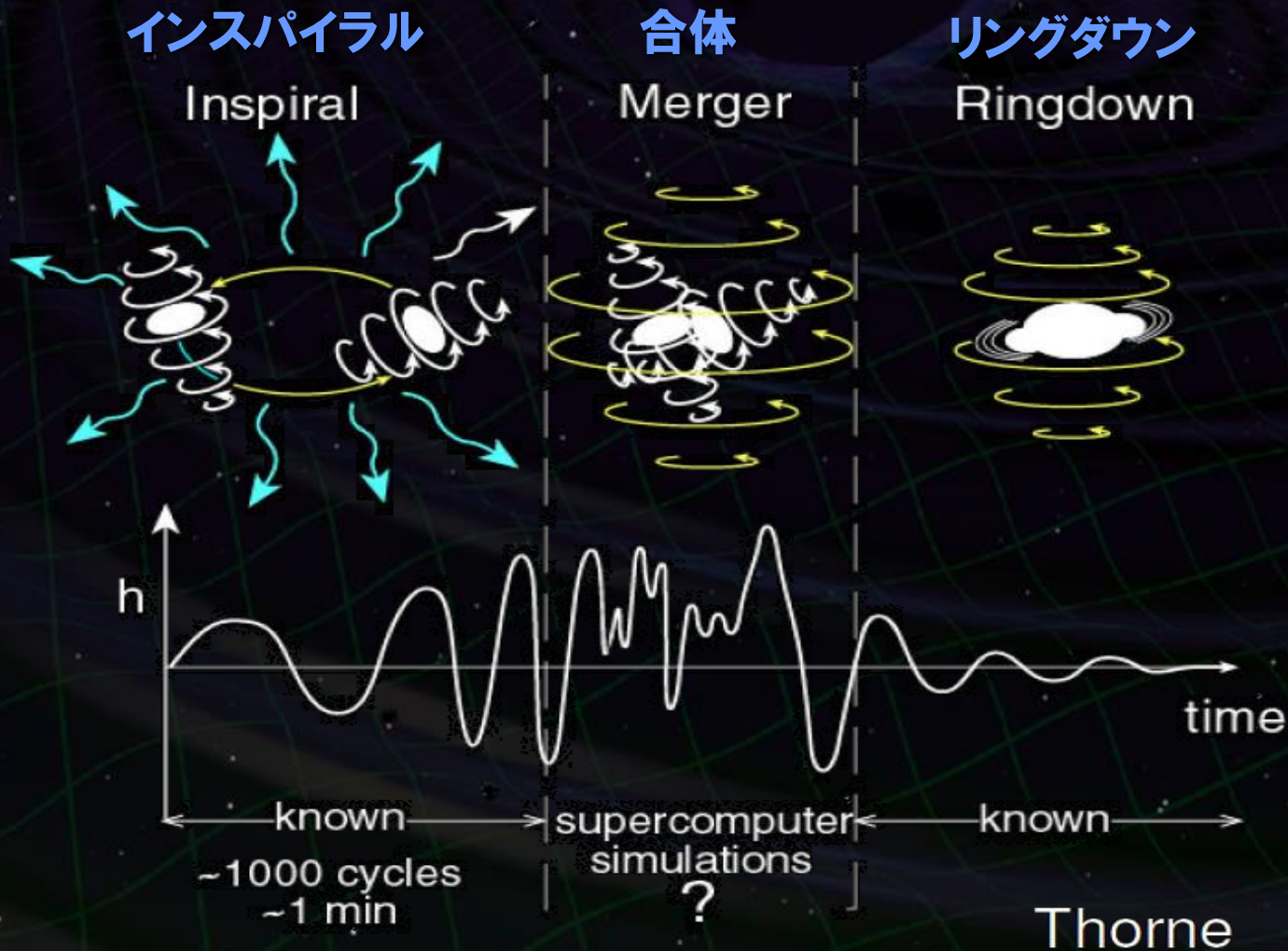


CG/KAGAYA



# 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

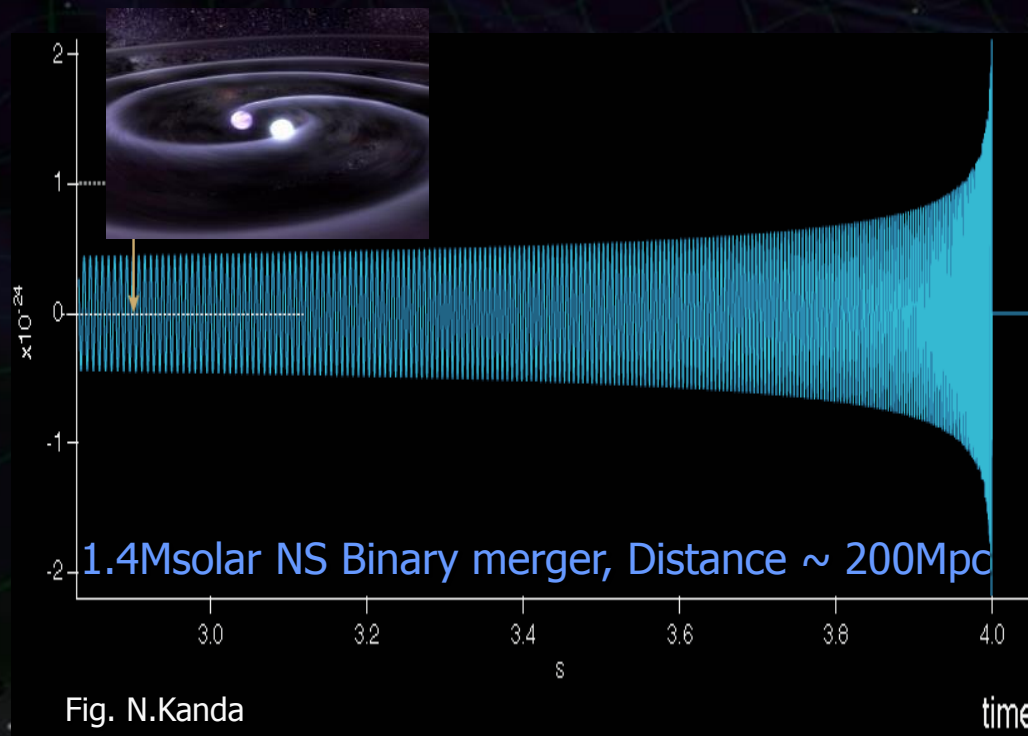


# (例) 連星合体からの重力波

## チャープ波

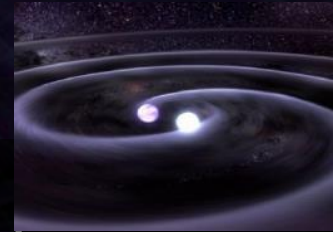
時間と共に振幅・周波数が増大.

→最終的に合体, BHになる.





## 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)

# 観測できたら???

- 観測で期待できる知見 -

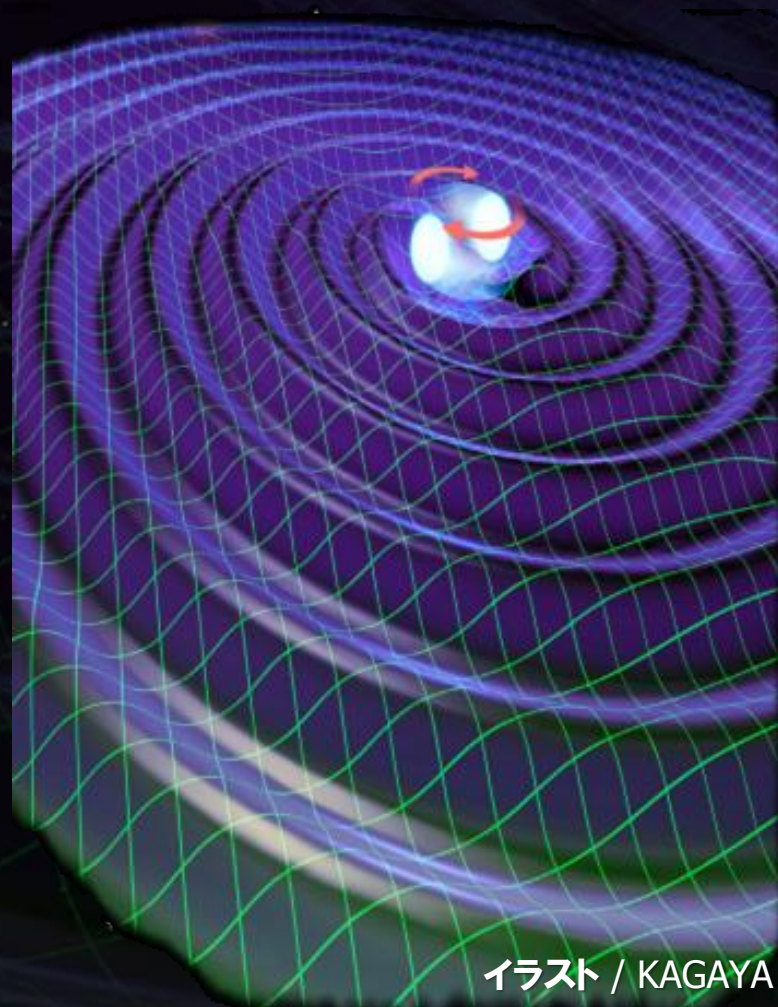


イラスト / KAGAYA



## • 重力波の初検出

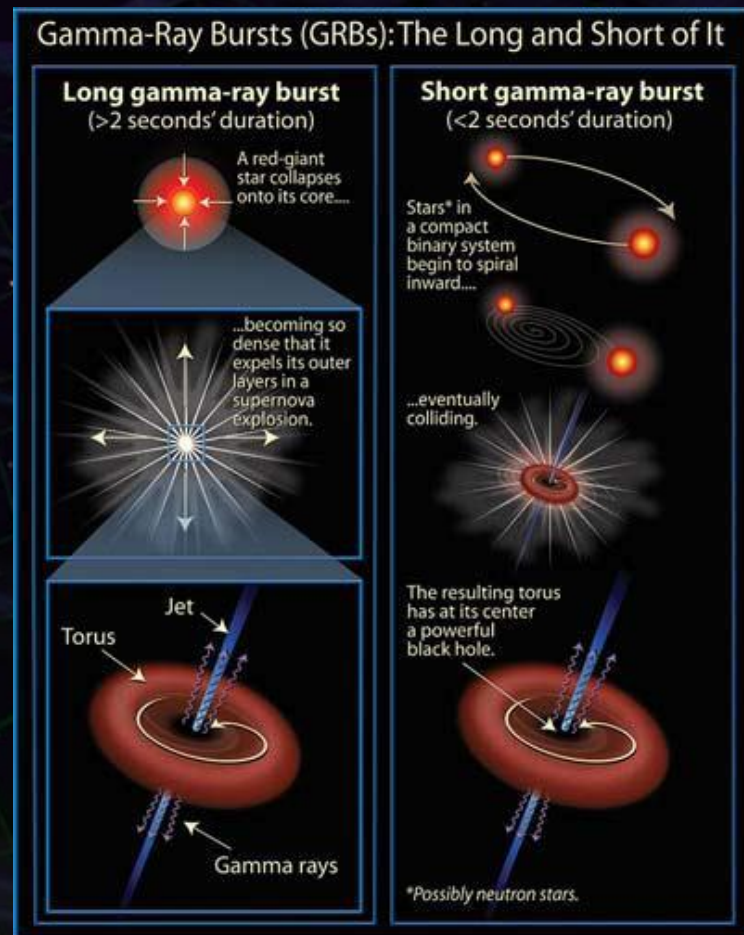
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生。
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

## ⇒ 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。

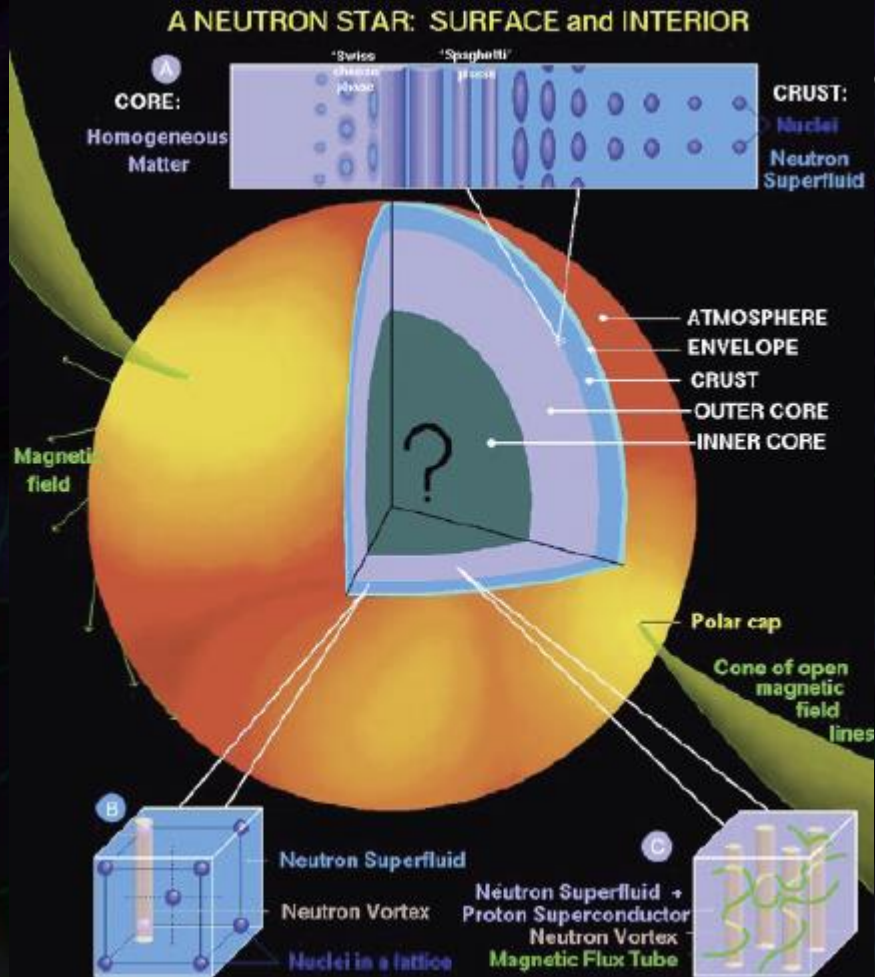
## • 宇宙論・銀河形成史に対する知見

- 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

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

$\rho_0$  は標準原子核密度

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

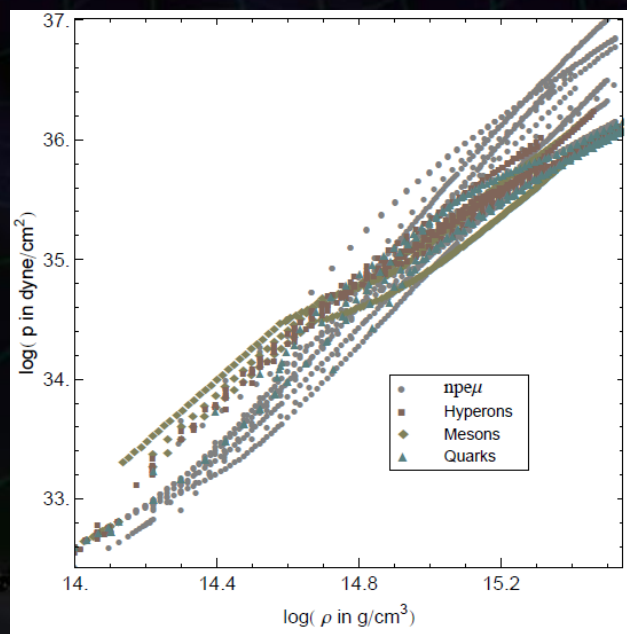
核密度以上の性質は  
ほとんど理解されていない。



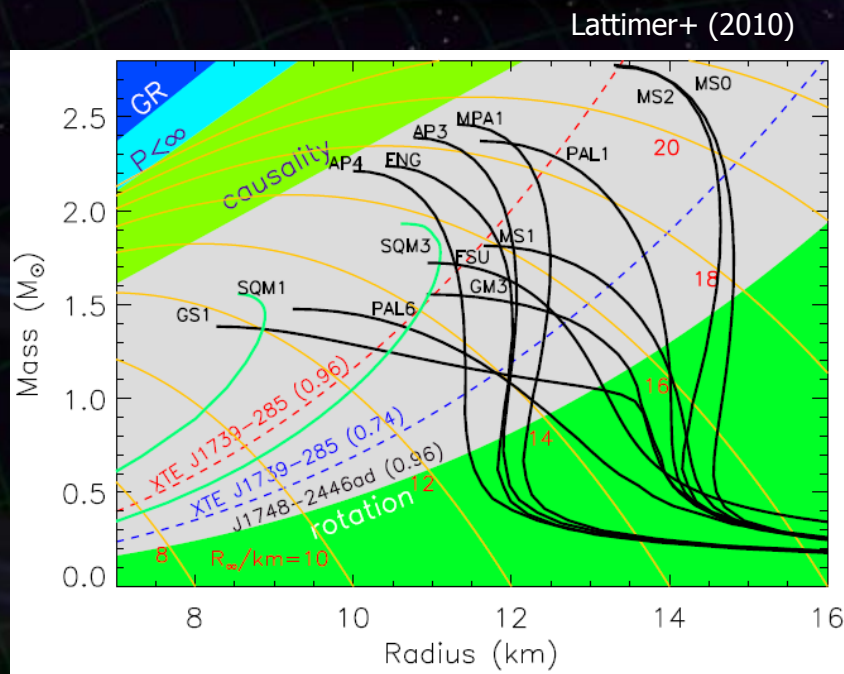
# 中性子星の状態方程式

## 高密度核物質の状態方程式 (EoS, Equation of State)

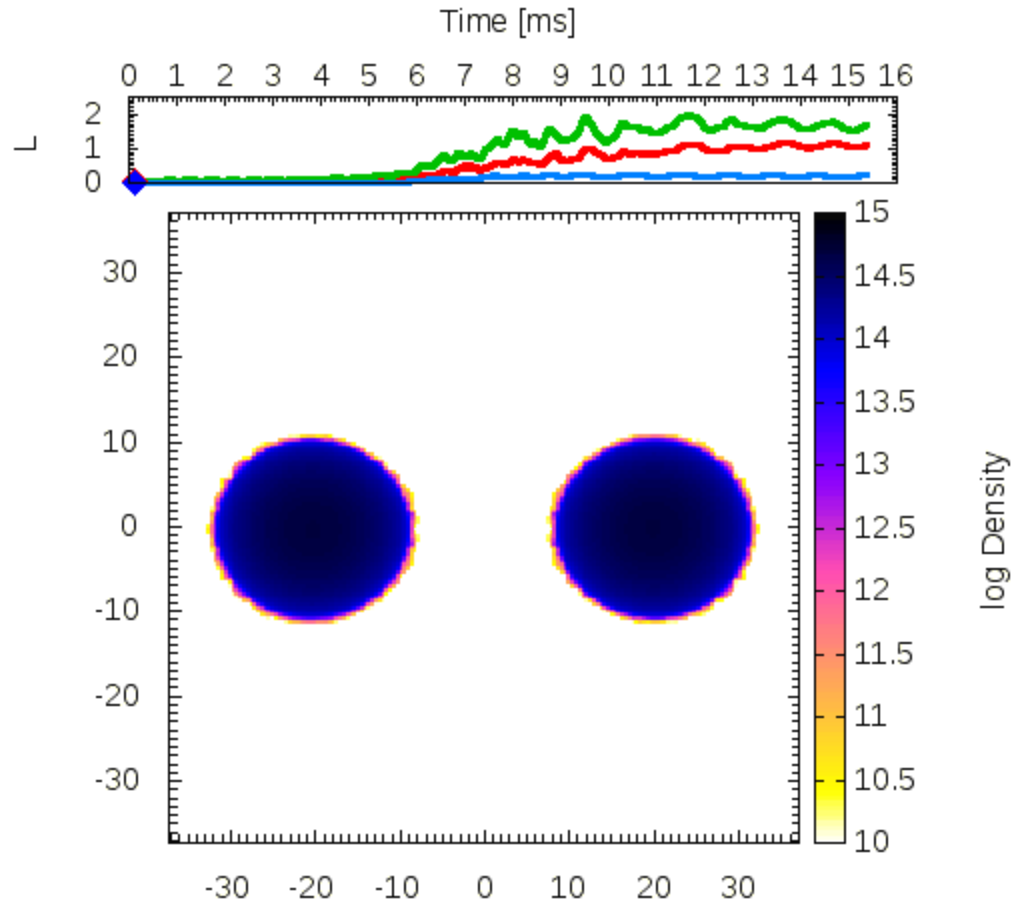
- 高エネルギー天体現象 (連星中性子星合体, 超新星爆発)
- 原子核物理 (ハイペロン, クォーク, 中間子凝縮)
- 高密度EoSと質量-半径が対応.
- 各EOSに応じた最大質量  $M_{\max}$  が存在



↔  
一般相対論的  
静水圧平衡



Lattimer+ (2010)



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

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

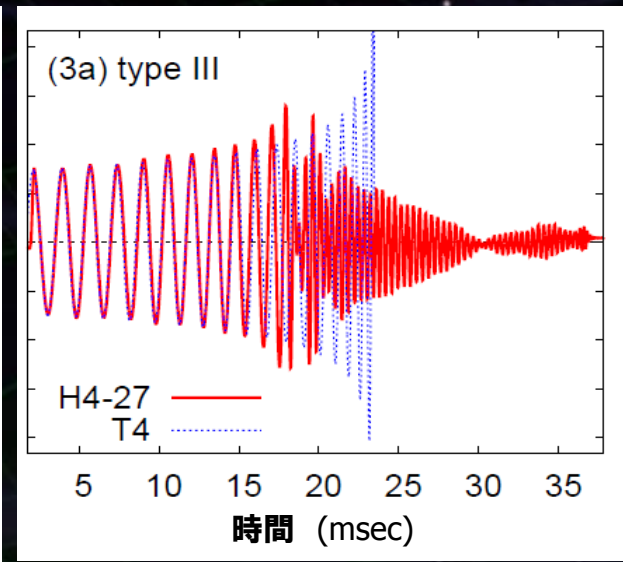
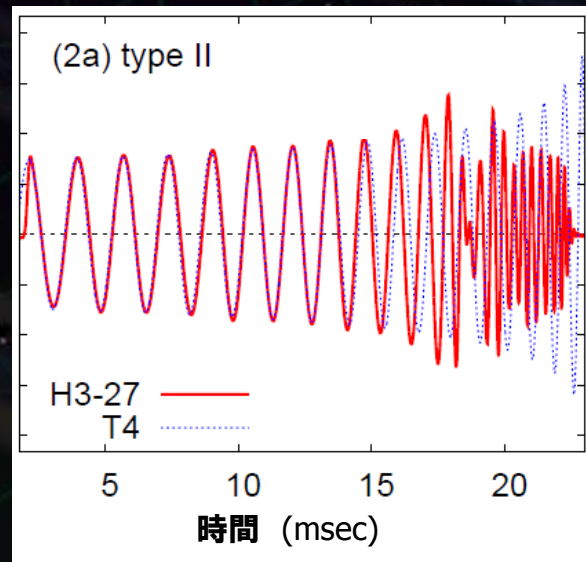
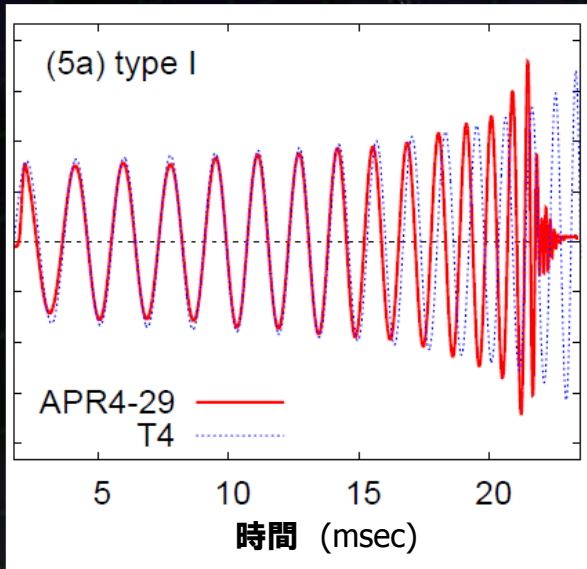
Short lived

BHへ崩壊

Type III  
寿命 > 5ms

Long lived

BHへ崩壊



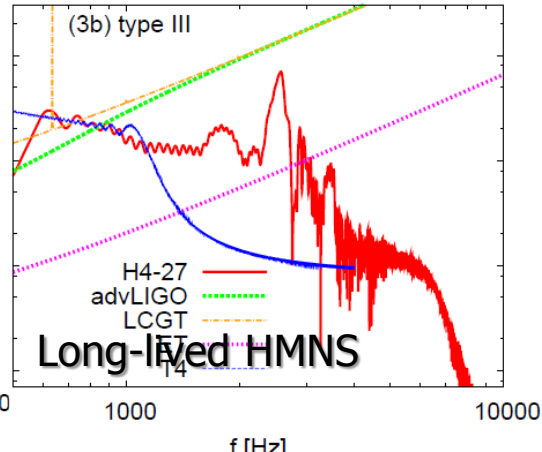
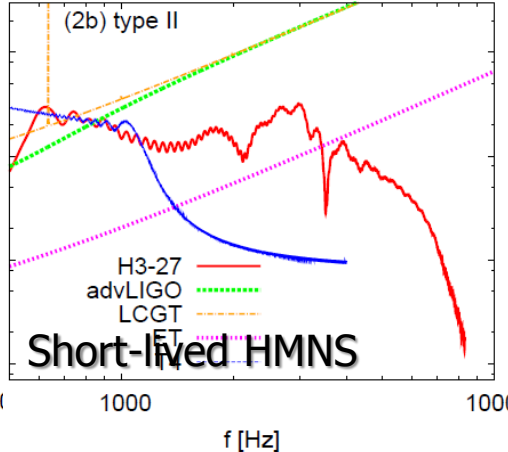
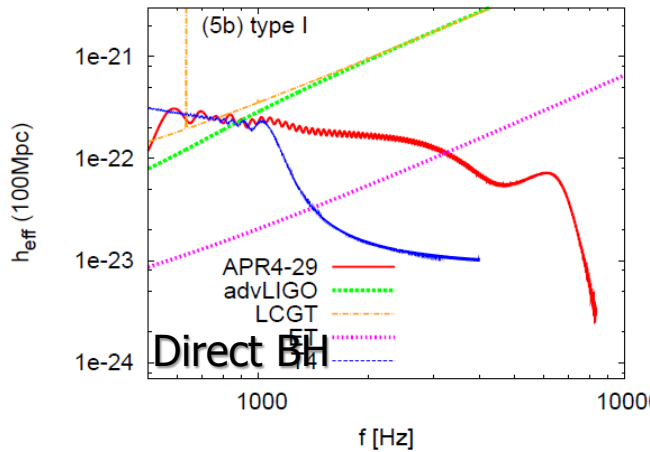
# 連星合体のスペクトル

距離100Mpc

APR4, Type I  
1.45-1.45Msun

H3, Type II  
1.35-1.35Msun

H4, Type III  
1.35-1.35Msun



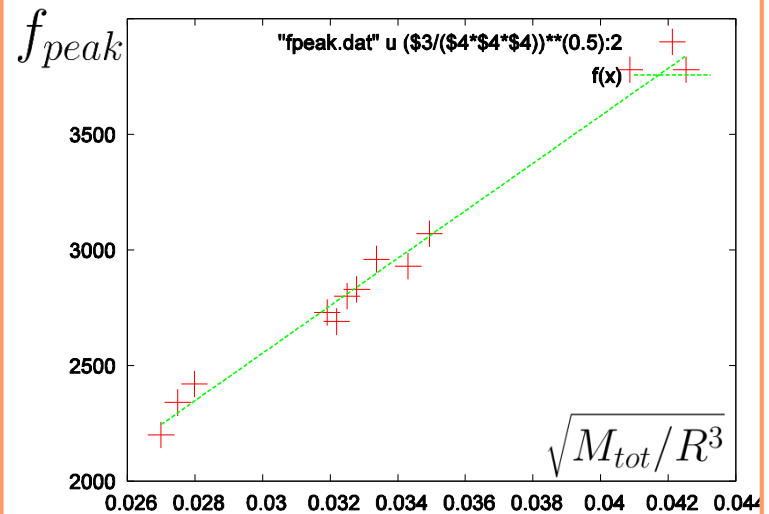
HMNSの回転周波数にピーク  
→ 中性子星の半径と相関



EOSに強い制限

Hotokezaka+, PRD (2011)

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



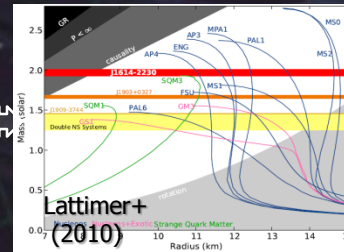
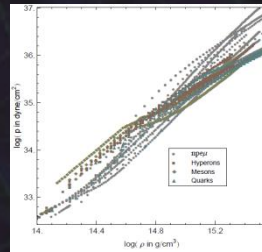
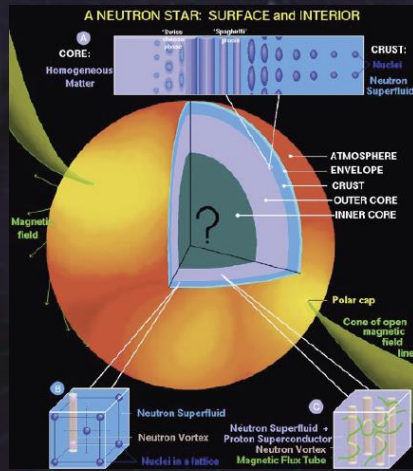


# 状態方程式と天文学

## 中性子星の状態方程式 (密度 $2 \sim 15\rho_0$ )

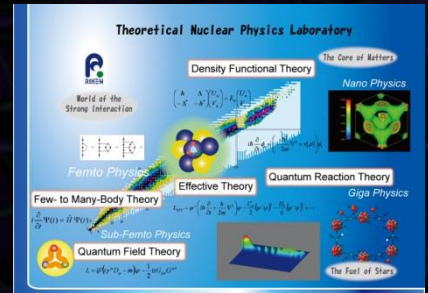
密度-圧力

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

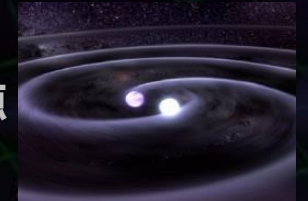
## 高エネルギー天体现象

→ 天文学, 極限状態の物理法則



## 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

## •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.



## 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

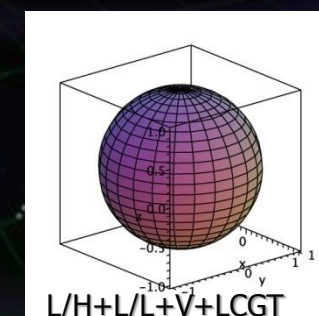
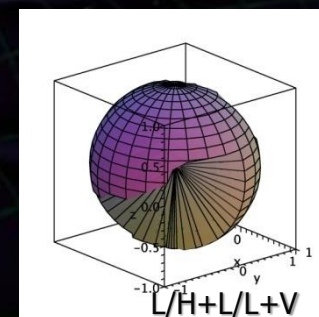
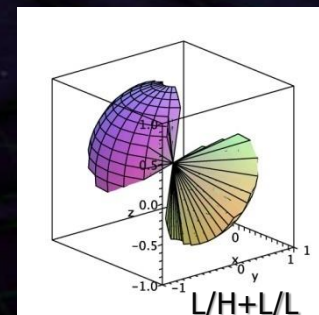
### 実際上の意義

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



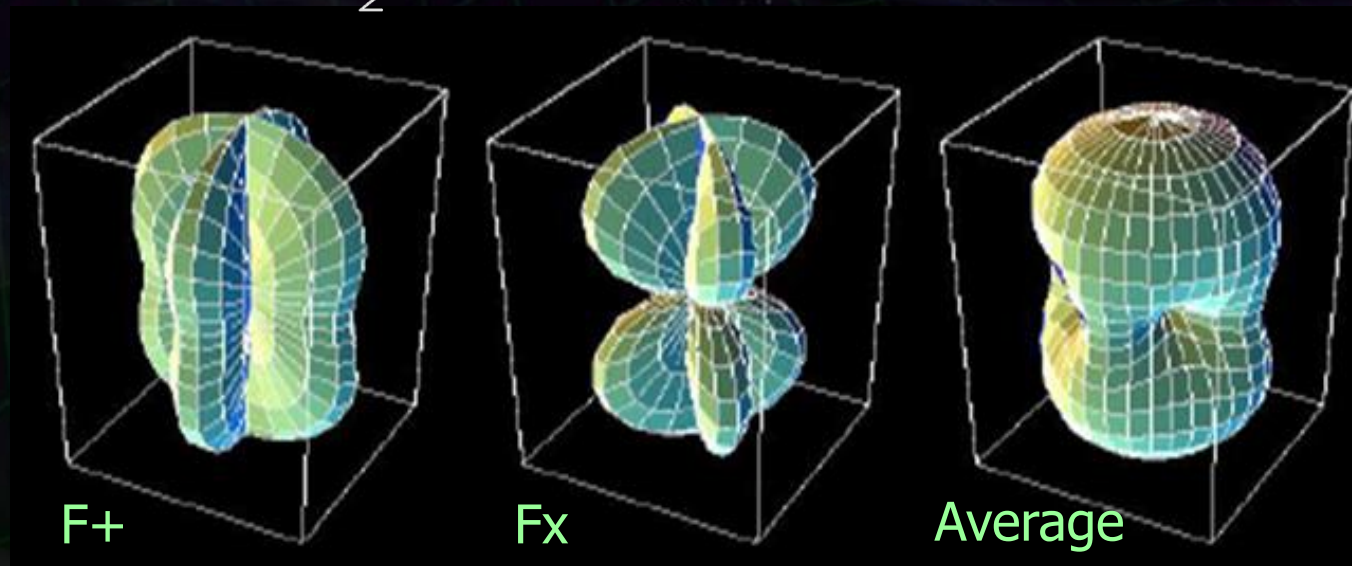
- 干渉計型重力波検出器：指向性・偏波依存性がある。

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

## 干渉計のアンテナパターン

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

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





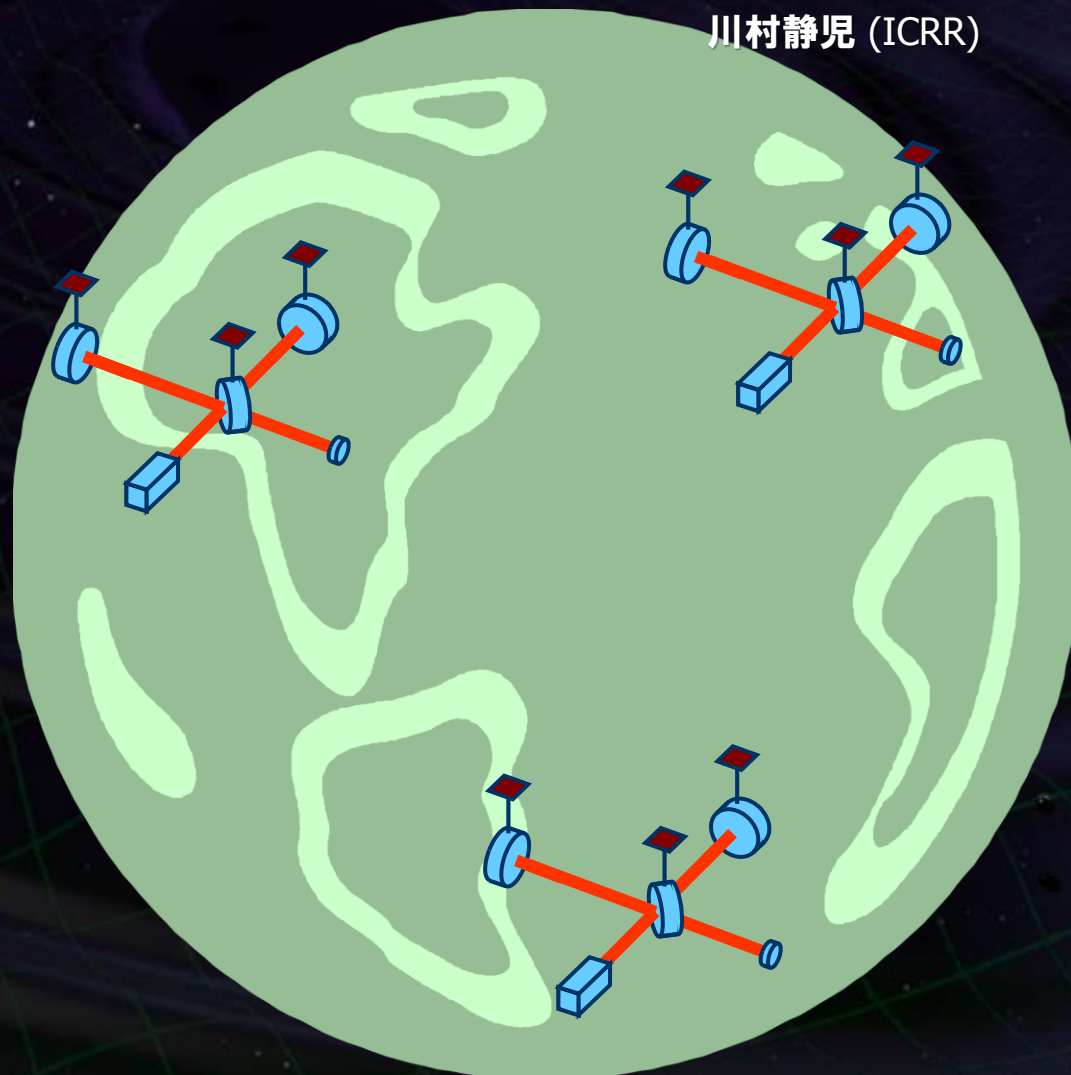
# 国際観測網での同時観測

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！

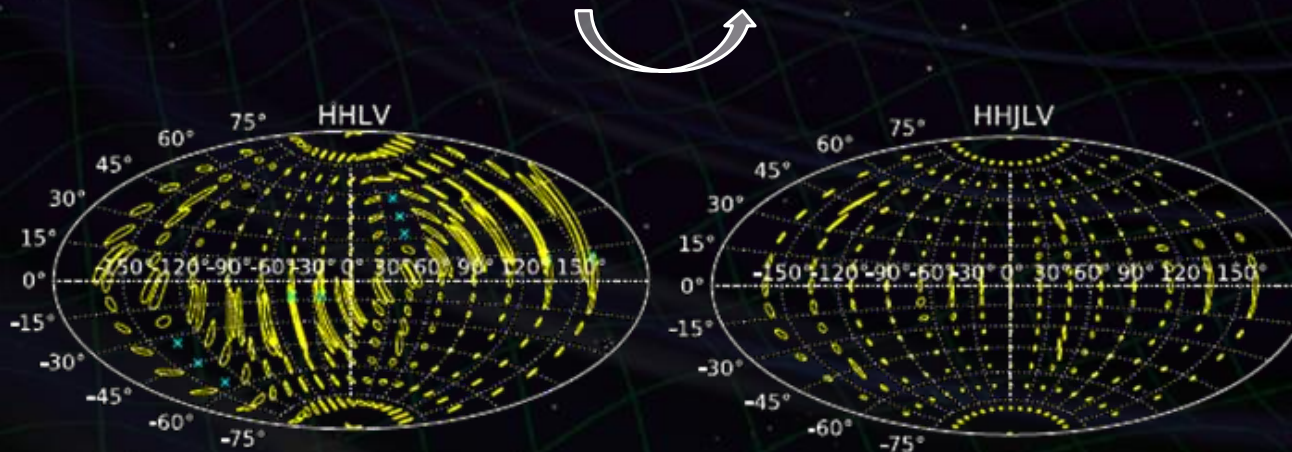


## 天球上の角度分解能

By H. Tagoshi

	LHV	LHVJ	LHVA	LHVJA
average of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	34.4	7.26	4.20	2.78
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	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



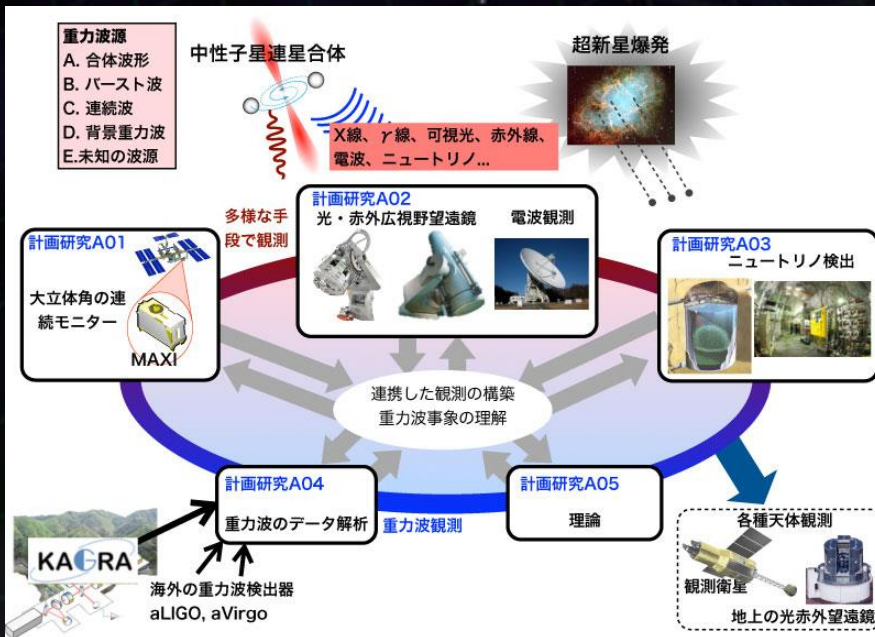
須藤 2011年度 東京大学物理学専攻修士課程入学ガイダンス資料

## ・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.



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.



# 望遠鏡建設中!!!

- KAGRAの現状 -

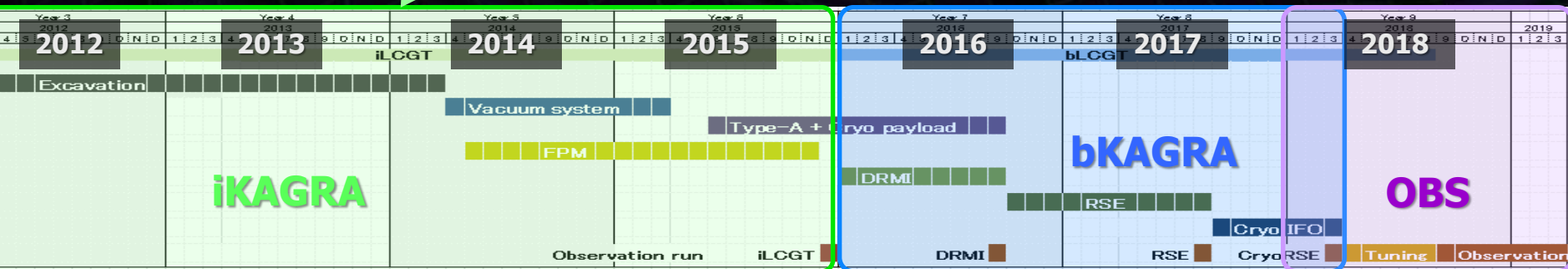


# KAGRAスケジュール

## • **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

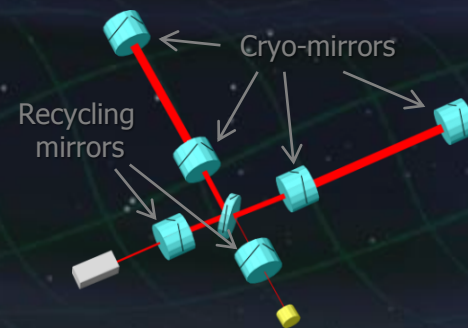
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



## • **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.





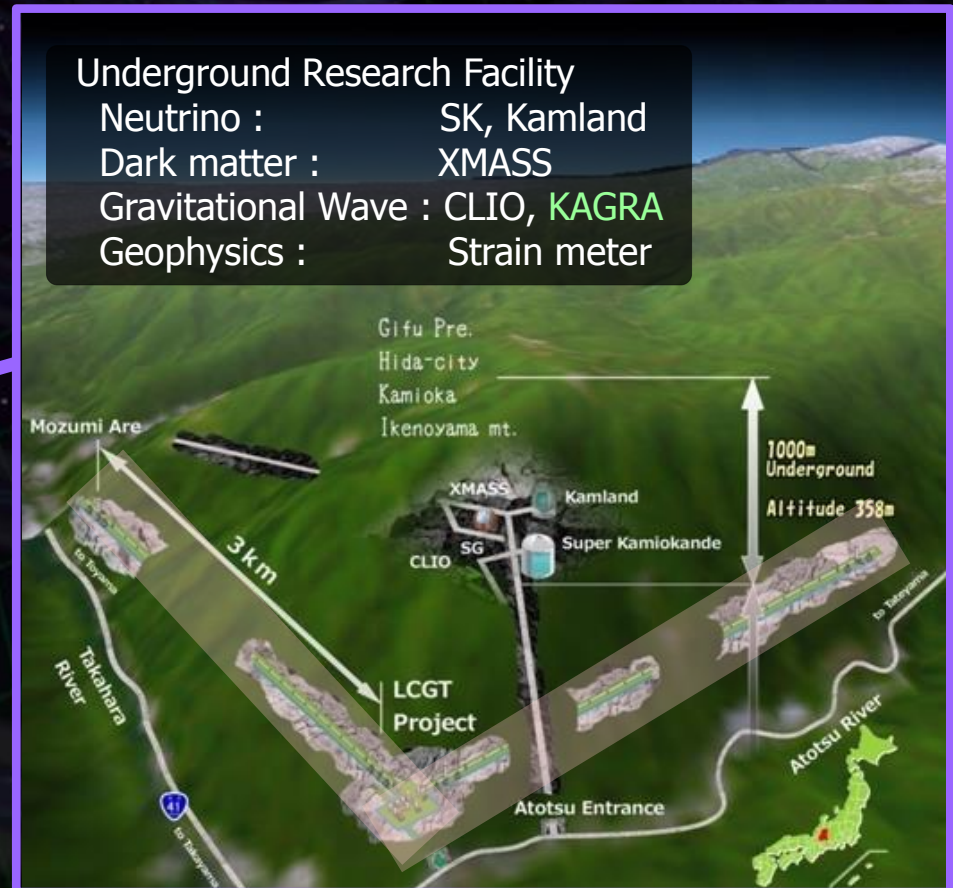
## 岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

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



富山大学から  
車で約1時間

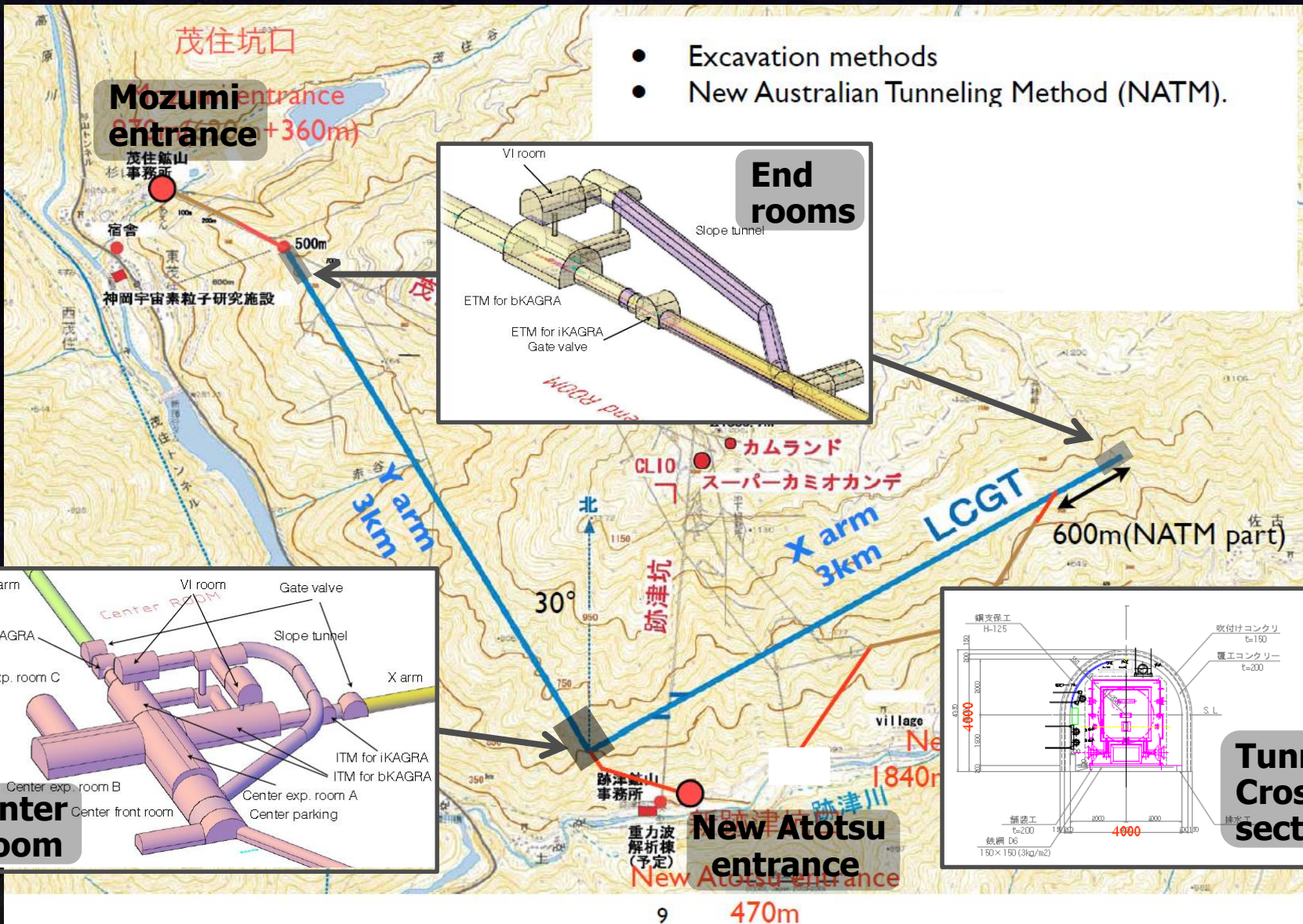
Map by Google



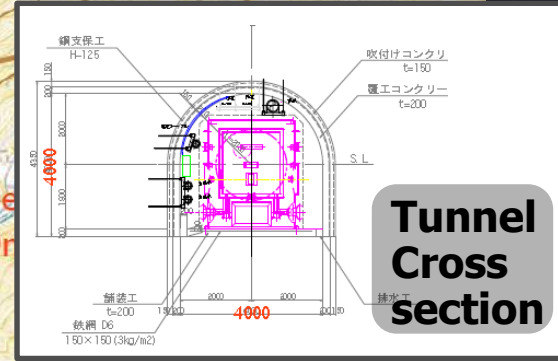
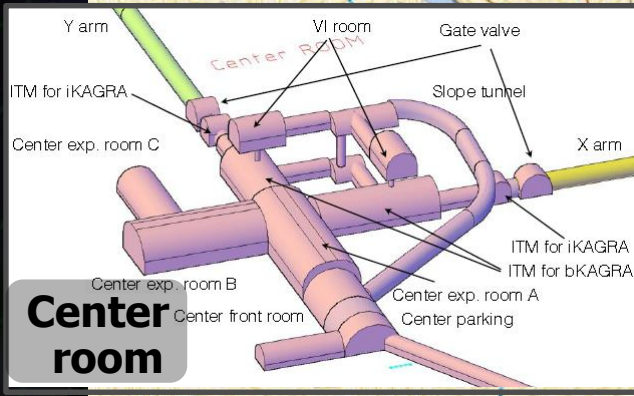
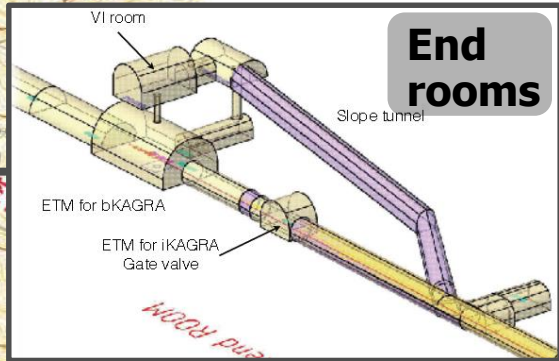
Underground Research Facility  
Neutrino : SK, Kamland  
Dark matter : XMASS  
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**  
Geophysics : Strain meter



# KAGRAトンネル設計



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



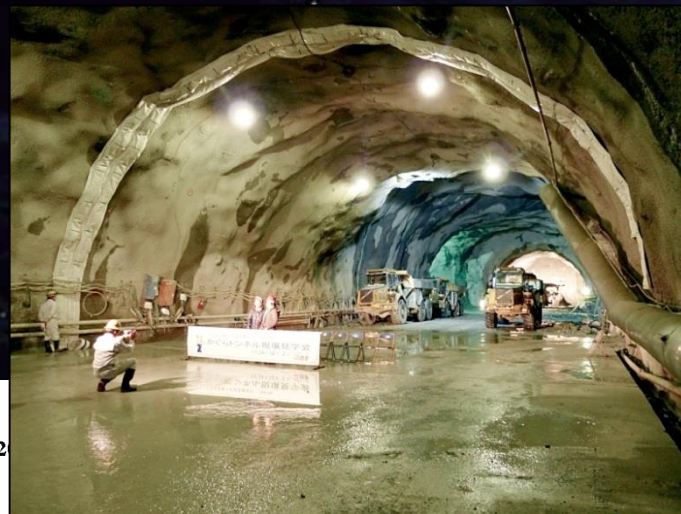


# 掘削工事の現状

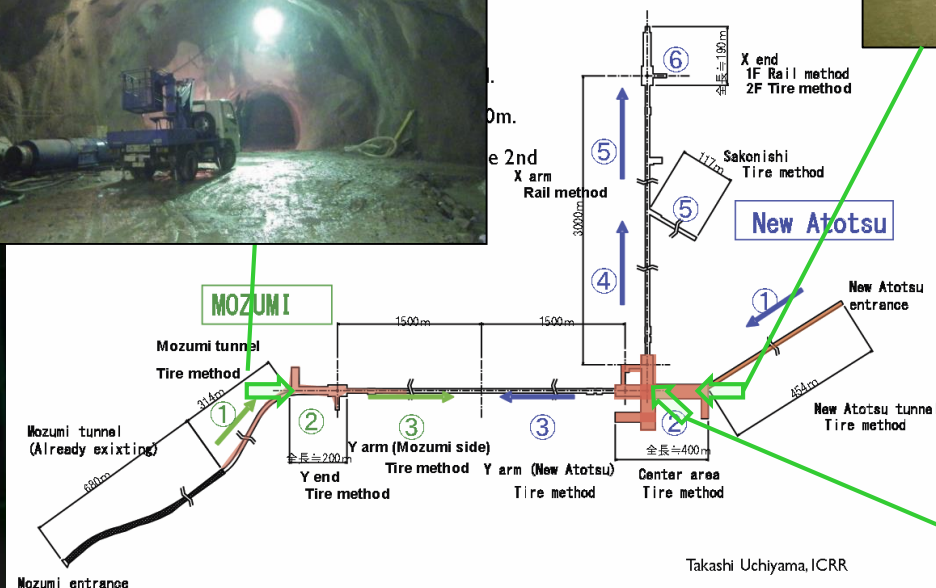
茂住口：  
Y腕トンネル



新跡津口：センタールーム

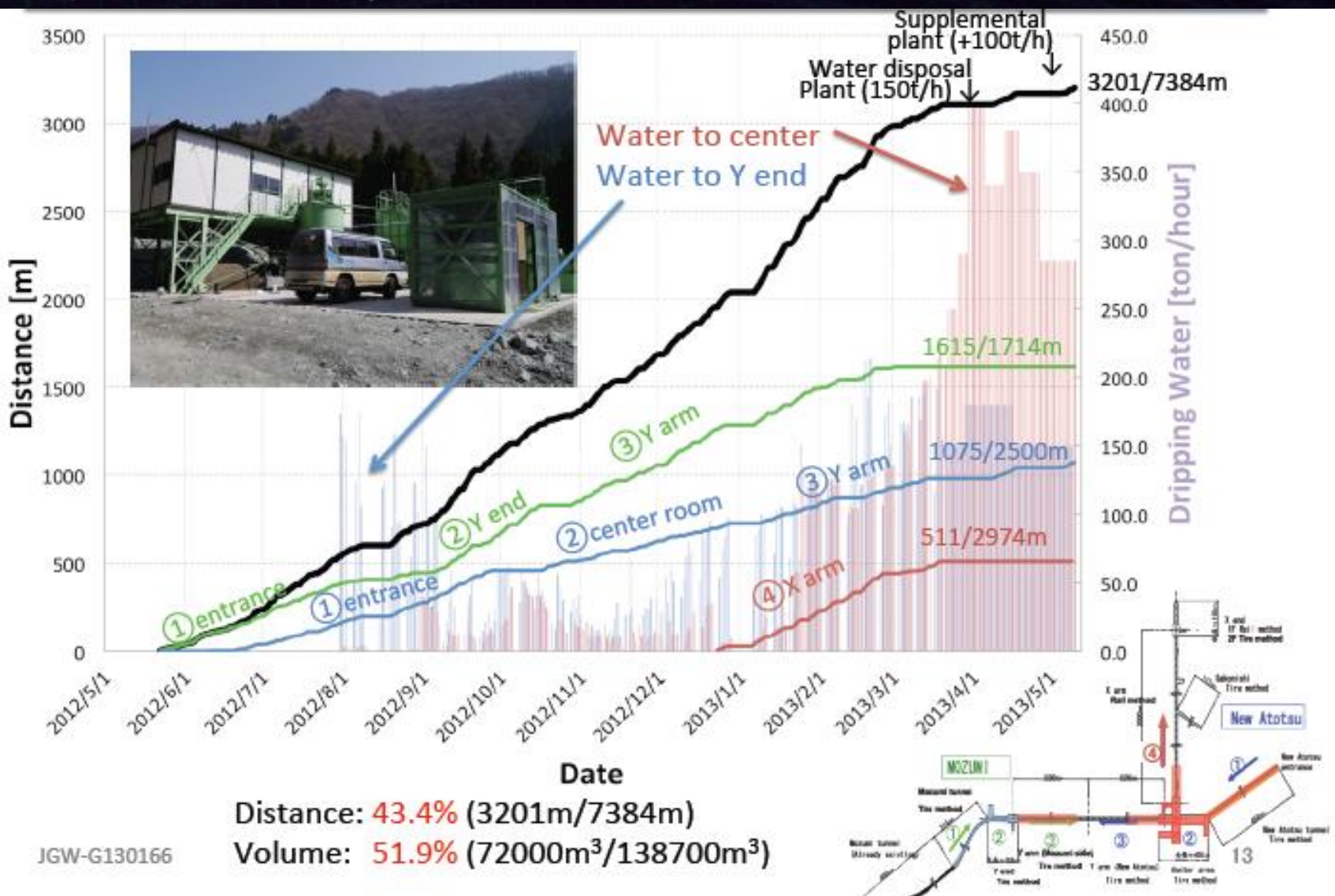


Report for the KAGRA  
2012/12/17. JGW-G12





# 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

**Last year: ~150m<sup>2</sup>**  
(1F of Community center)

**This year: 338m<sup>2</sup>**

Designing a new building

Current GW group area

2F

1F

5130166

O.Miyakawa ,  
GWADW at Elba  
(May 2013)



# 真空ダクト

3km x 2本の真空ダクト :

12m,  $\Phi$ 800mm を478本接続. → 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

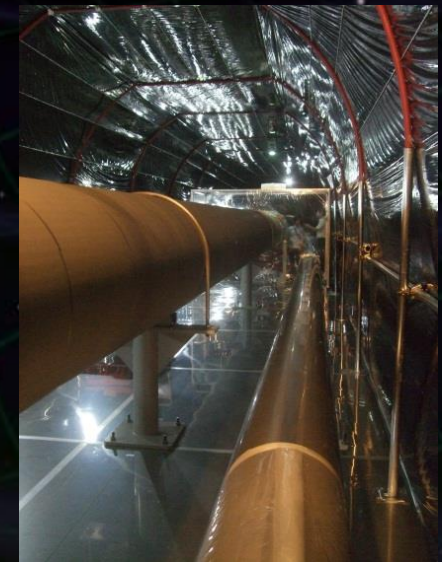
Presentation  
By Y.Saito (KEK)



## 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)



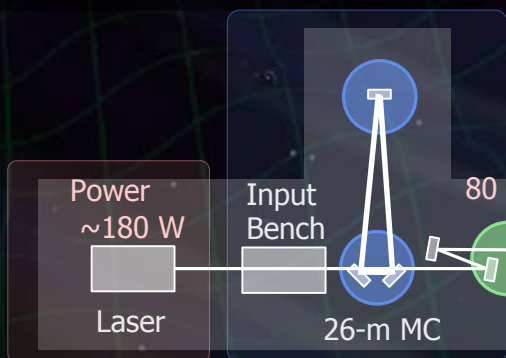
June 28, 2012, Photo by Kamiizumi and Iwasaki (ICRR)



# KAGRA 干涉計構成

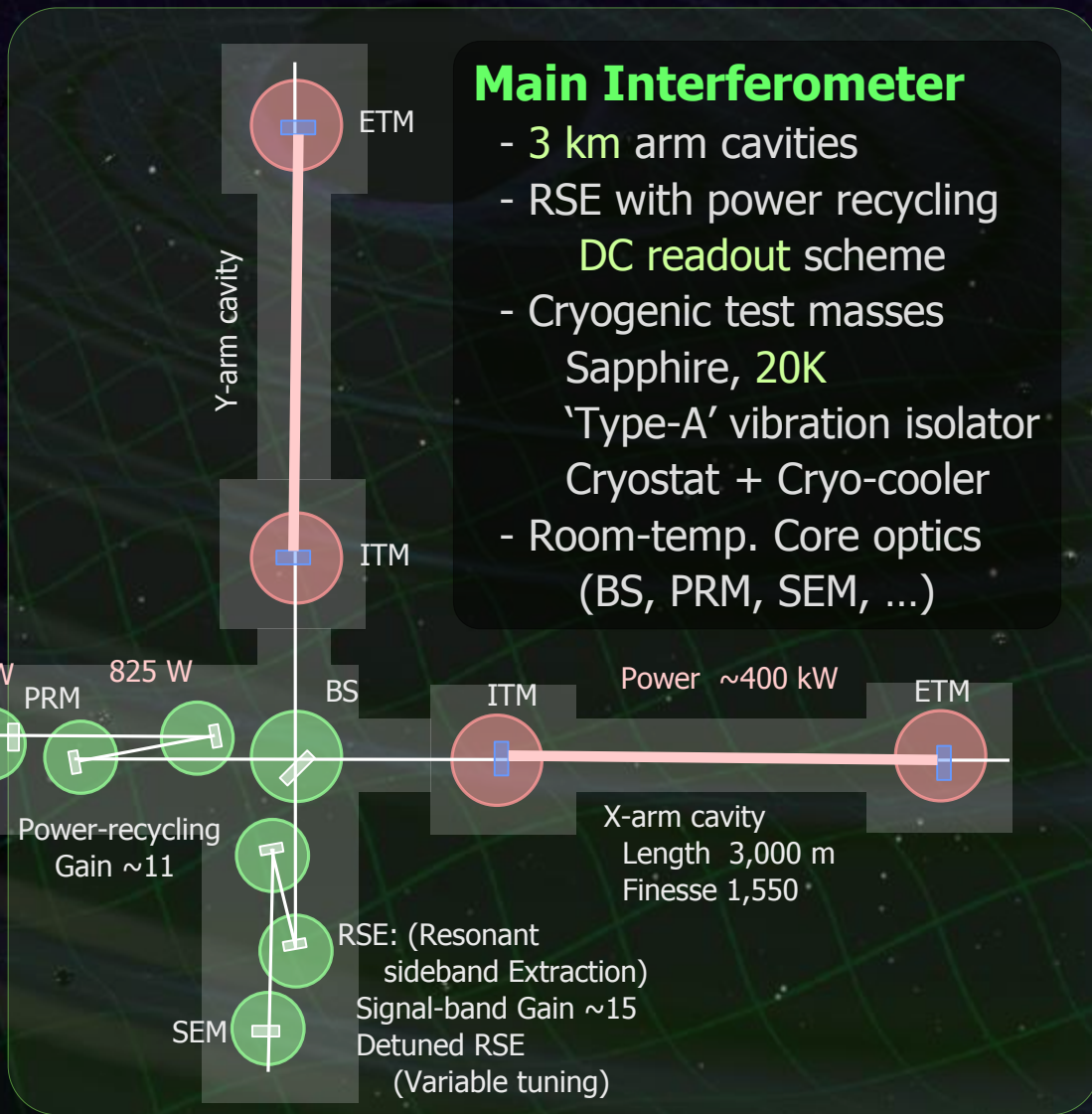
## Input/Output Optics

- 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

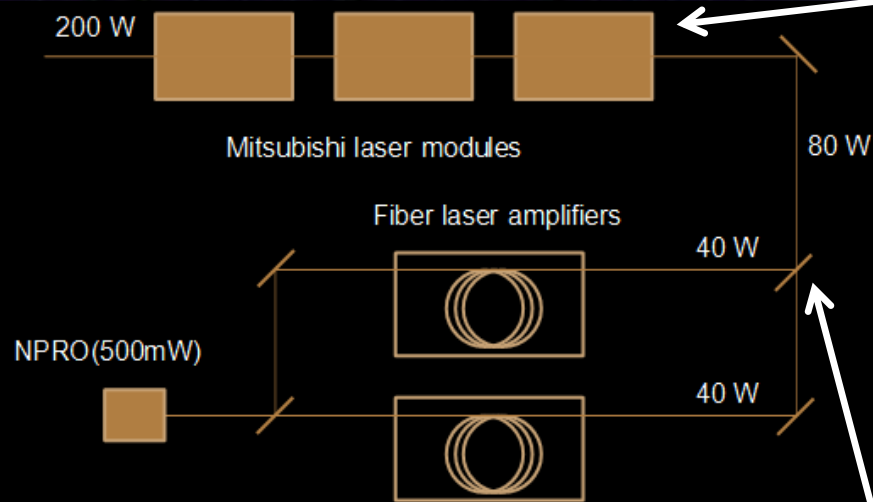


## Main Interferometer

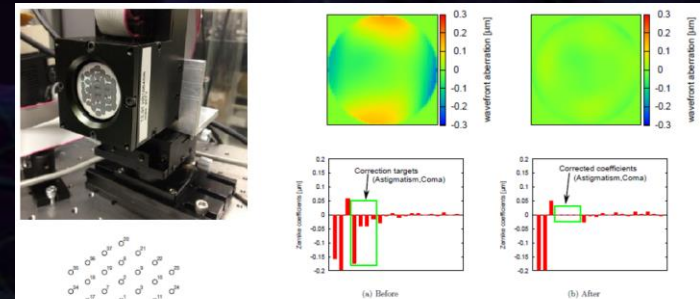
- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling  
DC readout scheme
- Cryogenic test masses  
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator  
Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics  
(BS, PRM, SEM, ...)



# 高出カレーザー光源



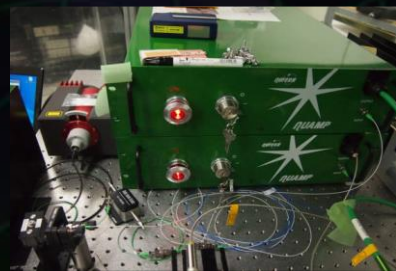
## Wave-front correction (for solid-state laser amplifier)



Deformable mirror:  
37 actuators

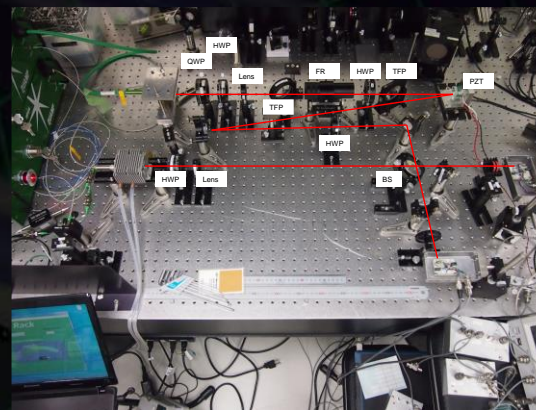
	Before pumping	After pumping	After correction
Strehl ratio	0.997	0.75-0.82	0.994

## High-power Fiber amplifier



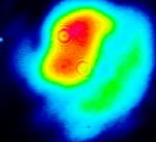
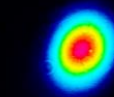
~40W / unit

## Coherent Addition



Bright port 78W

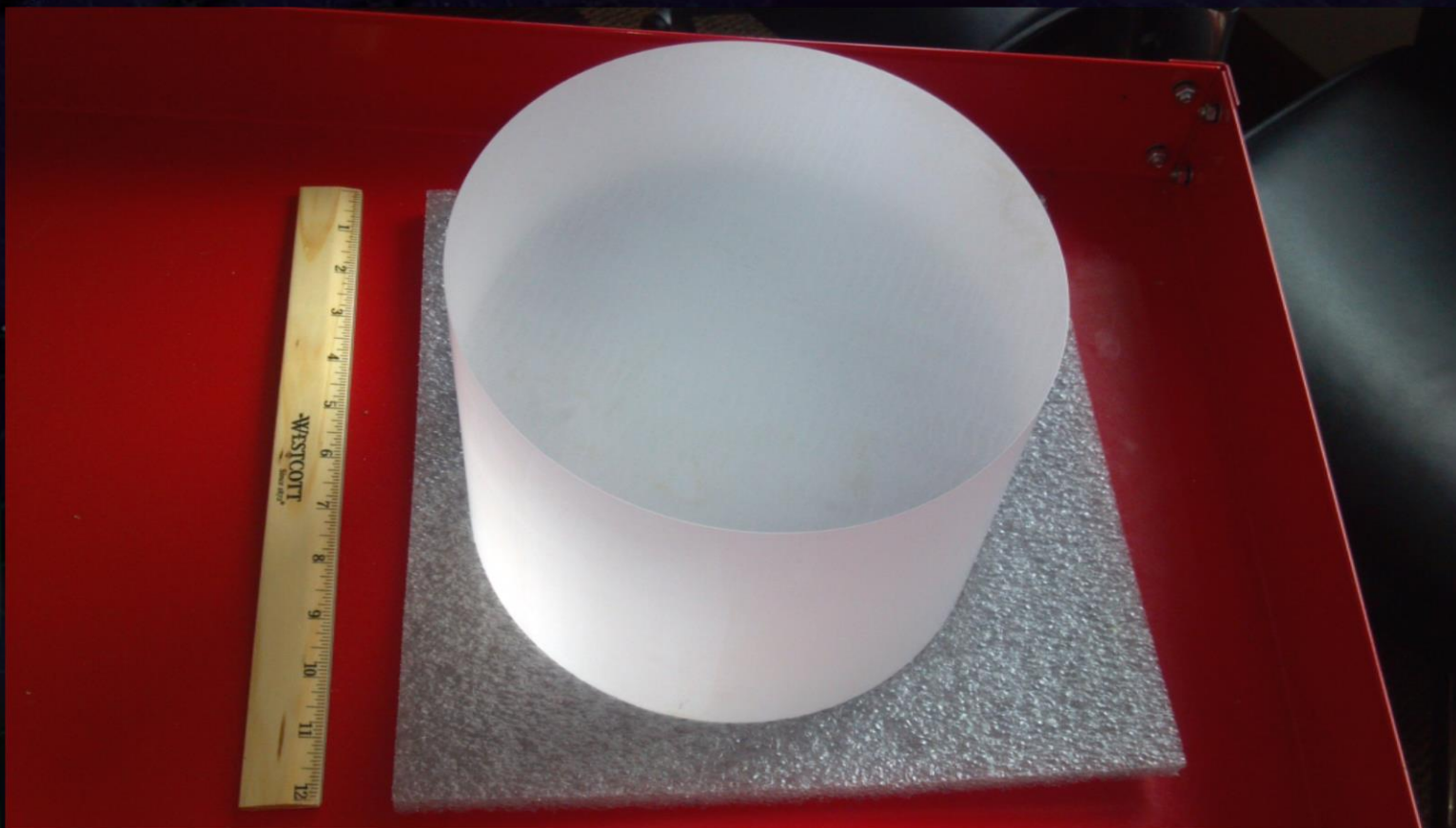
Dark port 4W



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

From presentation by N.Mio

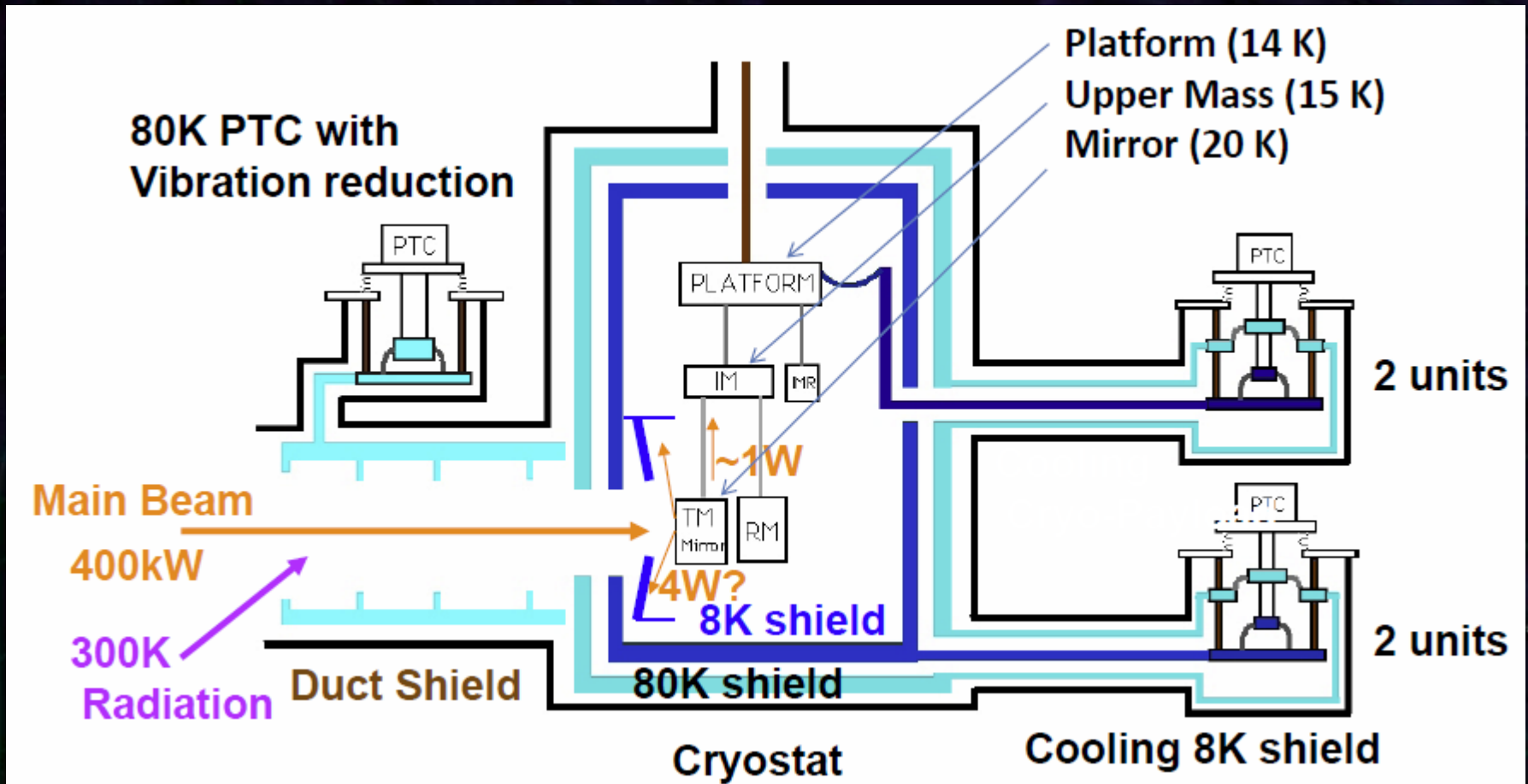
# サファイヤ鏡



2 Sapphire substrates were delivered  
( $\Phi 220\text{mm}$ , t 150mm, c-axis)



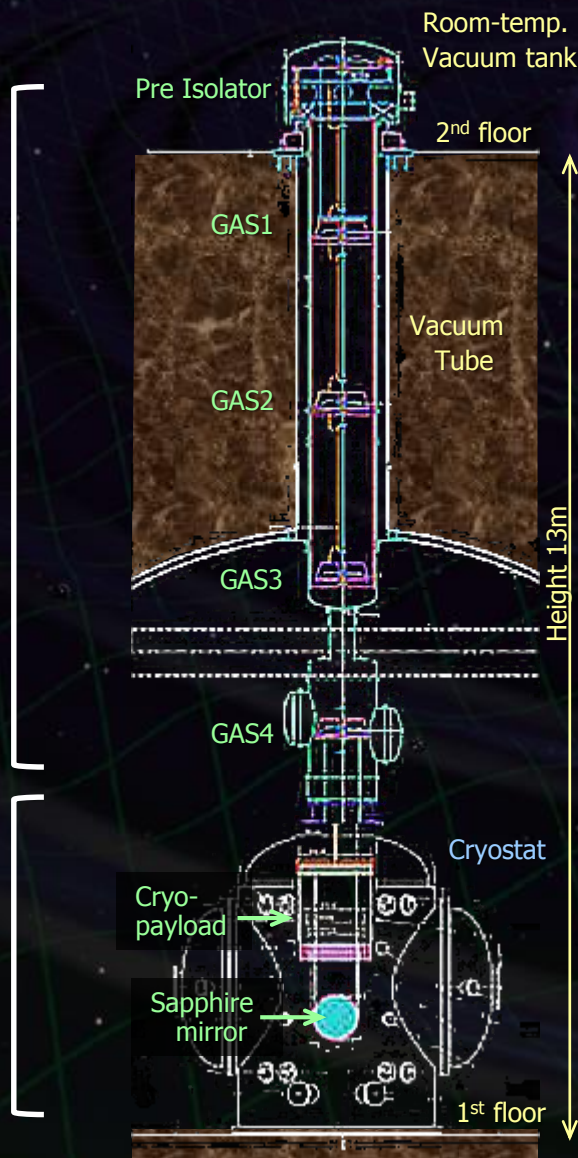
# 鏡冷却システム



# 低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.  
Filter chain

Cryogenic  
Payload



Room-temp.  
Vacuum tank

2nd floor

'Type-A'  
System

Vacuum  
Tube

Height 13m

Cryostat

Cryo-coolers

1st floor



# 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.

Inside the Rad. Shield



Cryostat #1 in preparation for installation of radiation shield.

Cryostat #2 under leak test.

Toshiba Keihin Factory (Oct 31, 2012)



Cryo-cooler unit

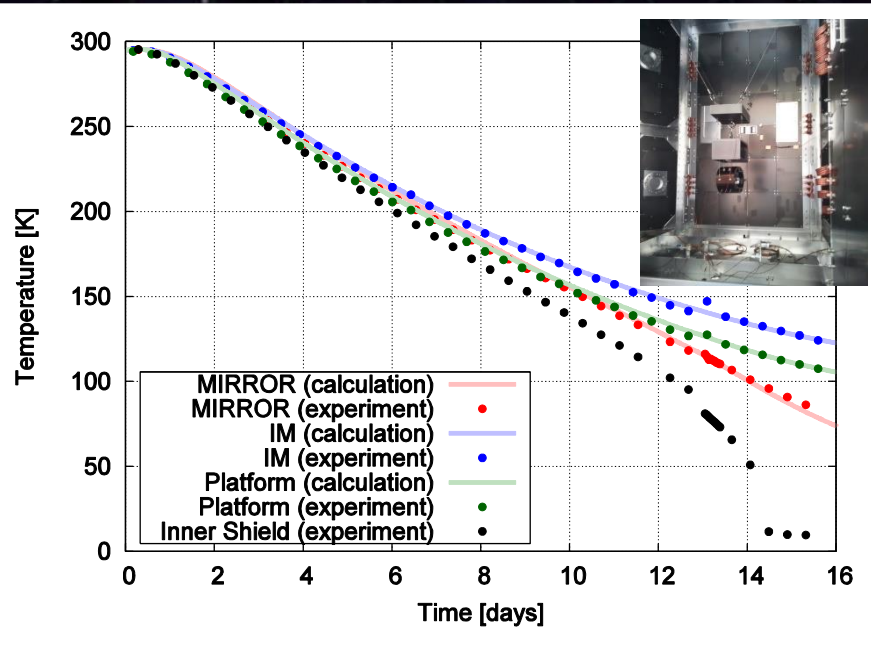


# クライオスタート冷却試験

約2週間で冷却であることを確認。  
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)

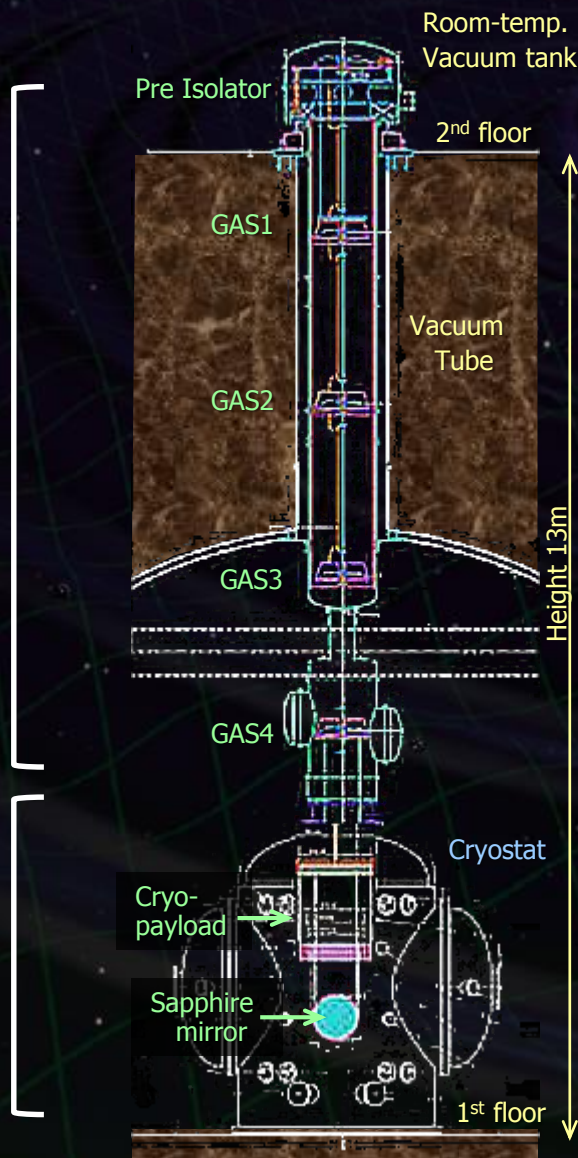
Photo by C.Tokoku



# 低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.  
Filter chain

Cryogenic  
Payload



Room-temp.  
Vacuum tank

2nd floor

'Type-A'  
System

Vacuum  
Tube

Cryostat

Cryo-coolers

1st floor

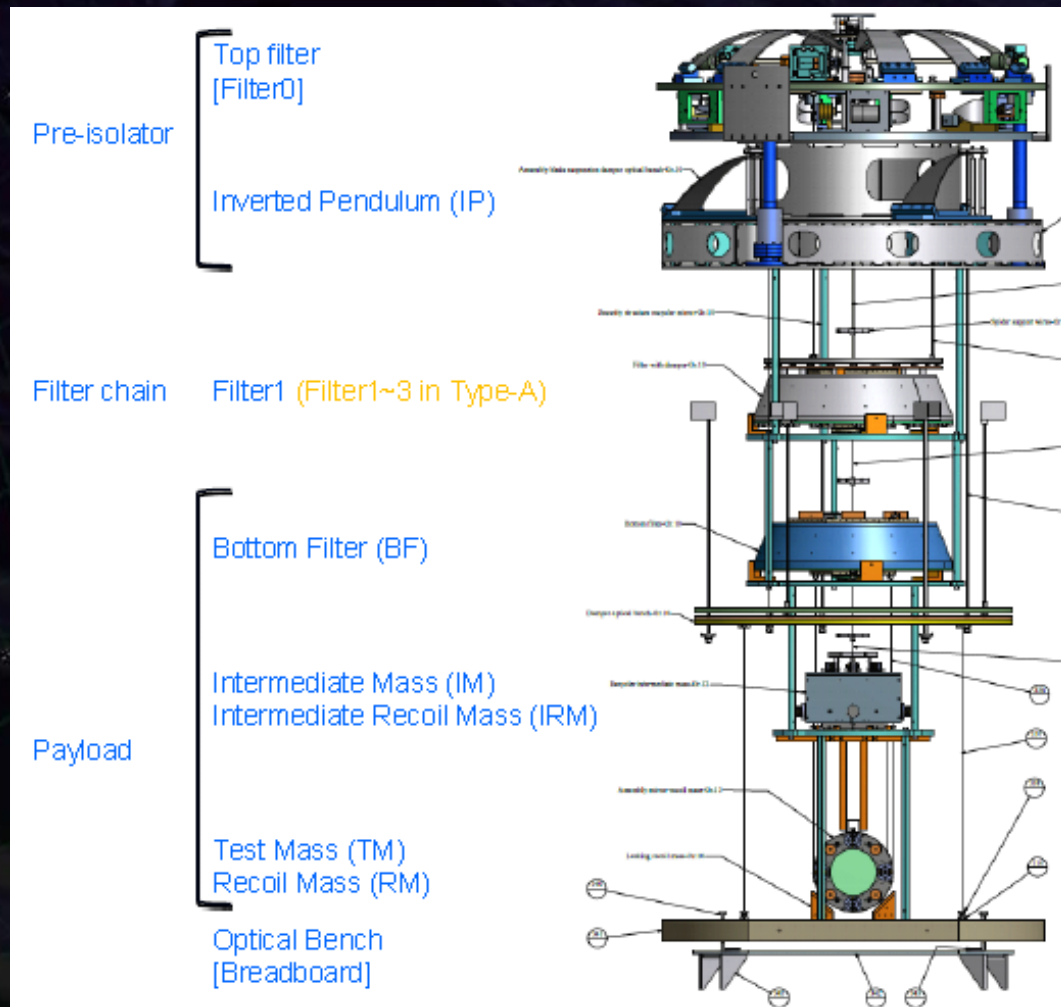
Height 13m

SAS (Seismic Attenuation System)

- Multi-stage, low-freq. isolator for silica room-temp. optics (BS, PRC, and SEC).

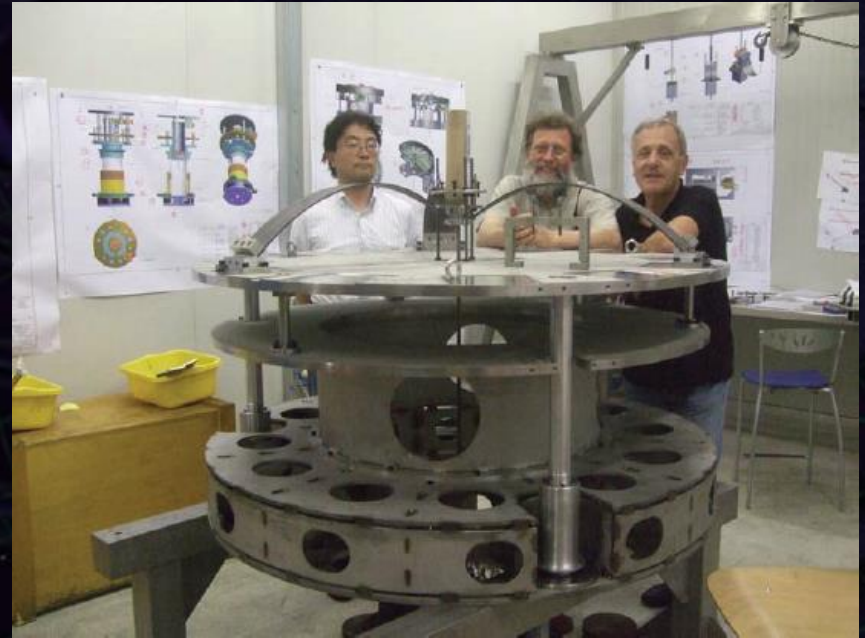
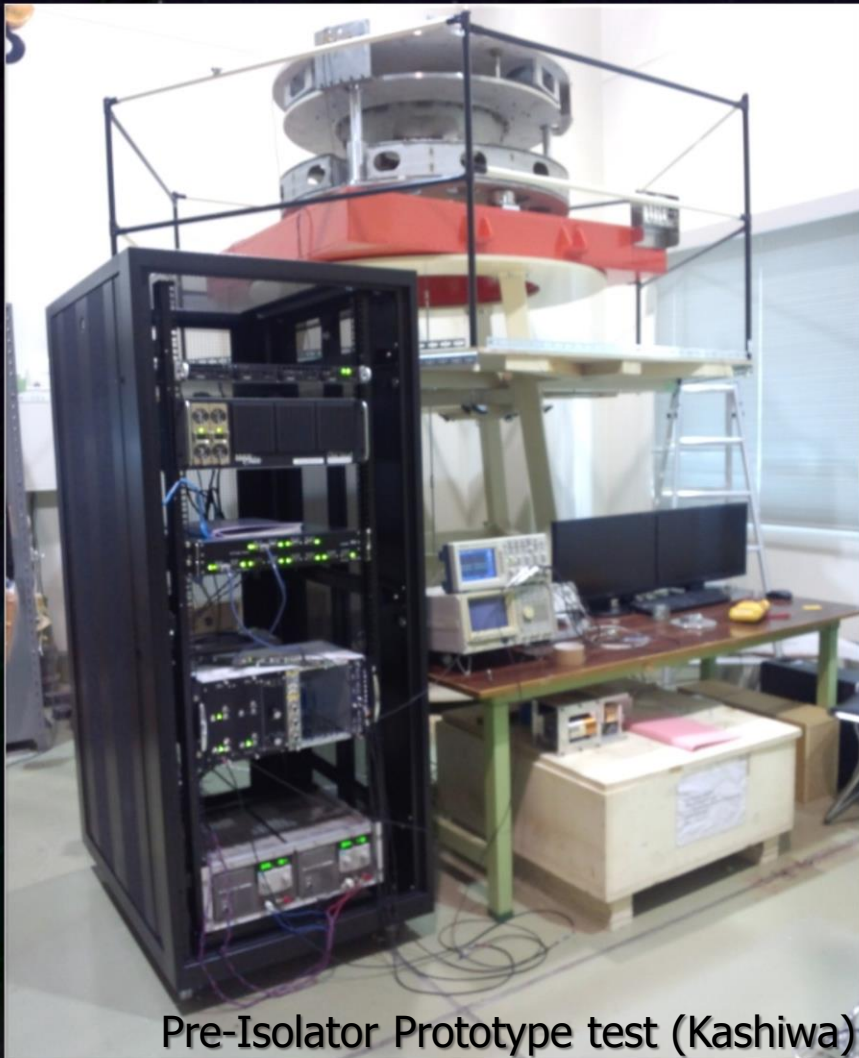
- Full system test at TAMA300 facility in this year.

R. Takahashi at External Review (April 2012)





# 防振装置



# まとめ



## KAGRA : プロジェクト進行中

- 観測可能距離  $\sim 200\text{Mpc}$   $\rightarrow$  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