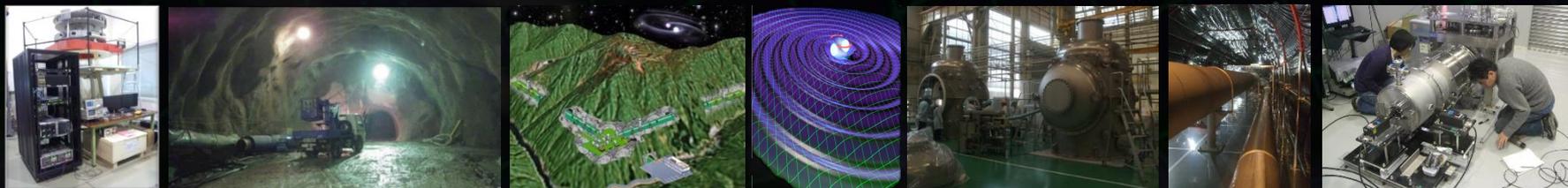


一般相対性理論白寿記念シンポジウム
～宇宙はどこまでわかったのか？～

アインシュタインの宿題と 重力波で探る宇宙

安東 正樹 (東京大学 物理学専攻/国立天文台)



一昨日の放送



コズミック フロント ~発見!驚異の大宇宙~



NASA ESA
STScI/AURA

過去の放送



※NHKサイトを離れます

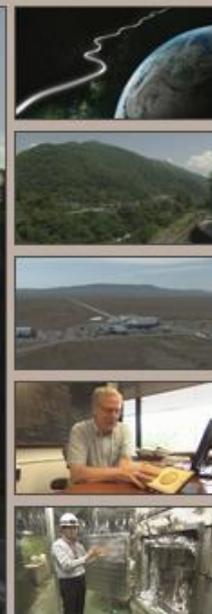
◀ 前回の放送

2014年9月25日の放送

「アインシュタイン最後の宿題 重力波を探せ」



岐阜県飛騨市神岡町にある池ノ山の地下で日本の大型重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)の建設が進められている。



- **アインシュタインが残した宿題.**
- **宇宙誕生直後の姿を直接見る.**
- **重力波望遠鏡 KAGRA.**

アインシュタイン が残した宿題

- 一般相対性理論と
重力波の直接検出 -

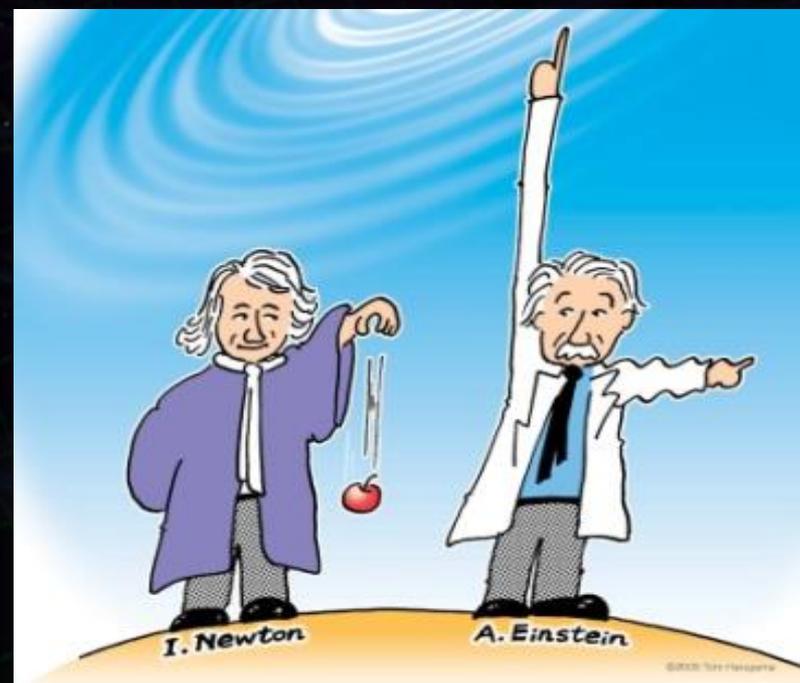
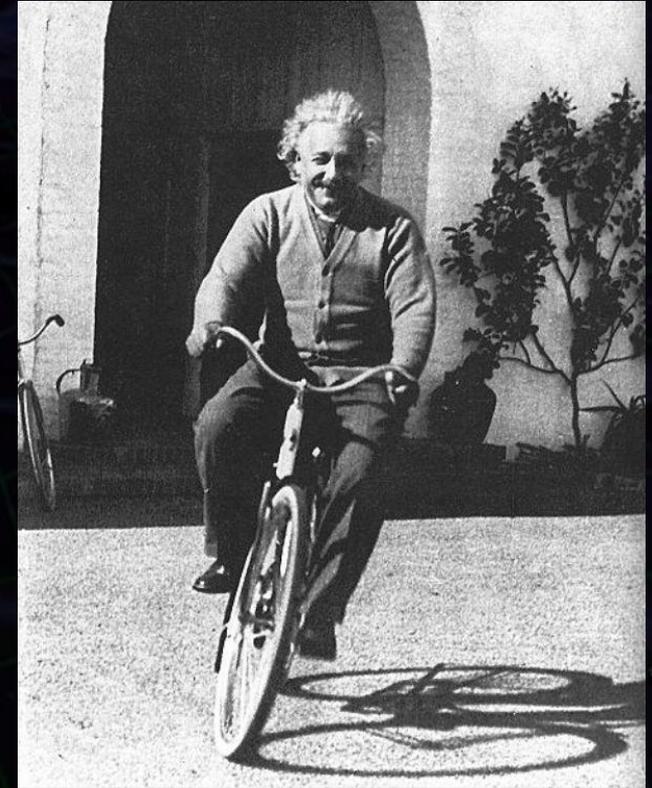


イラスト : Tom Haruyama

アルベルト・アインシュタイン

(理論物理学者, 1879 - 1955年)

- 1905年 光電効果の理論的解明.
→ 1921年 ノーベル物理学賞.
- 相対性理論を構築.
 - 1905年 特殊相対性理論
 - 1916年 一般相対性理論
→ 重力の効果も取り入れ一般化.



一般相対性理論 (アインシュタイン, 1916)



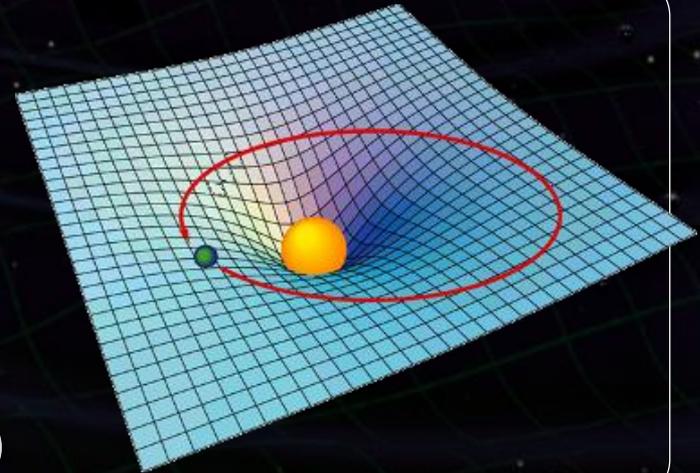
→ 重力を時空の性質と解釈

アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

↑
時空の曲がり
を表す量

↑
物質のエネルギー
(質量, 運動量など)



物質が時空の曲がりを生み出し、
時空の曲がり重力として物質の運動に影響する。

重力を時空の曲がり(潮汐力)として表現.

→ その曲がり(潮汐力)が波として伝搬する解がある.



物質の変動, 形状の変化
→ 時空の歪みが
'さざなみ'として伝播.

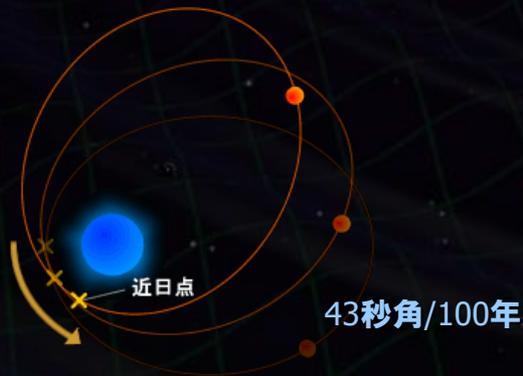


重力波

アインシュタインの一般相対性理論は正しい???

→ '古典的'な検証実験.

水星の近日点移動



(アインシュタイン, 1915)

光の曲がり (重力レンズ)



皆既日食時に、恒星の
見かけの位置を観測。
(エディントン, 1919)

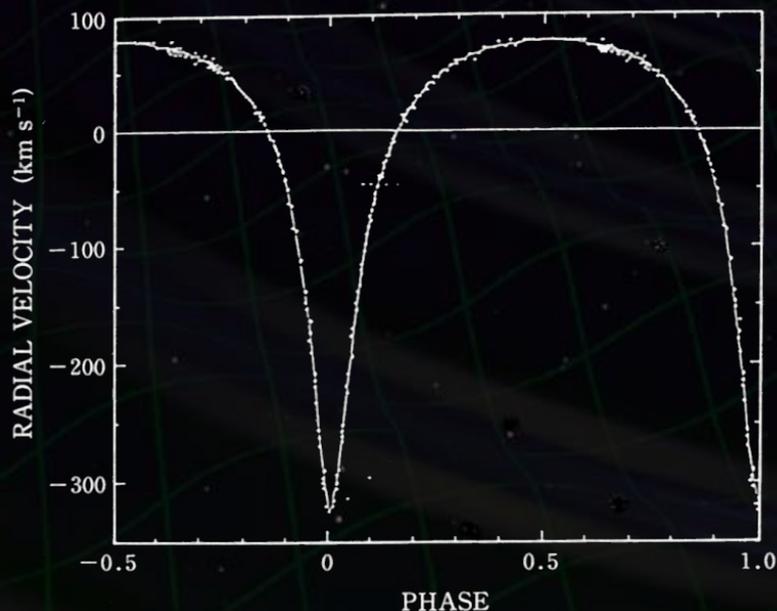
その他, 重力赤方偏移, シャピロ遅延, GPS補正, 慣性引きずり効果など多数.

連星パルサーPSR B1913+16 の発見

(1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

伴星によるドップラーシフトの効果

→ パルス周期の規則的な変化.



公転周期: 7.75時間

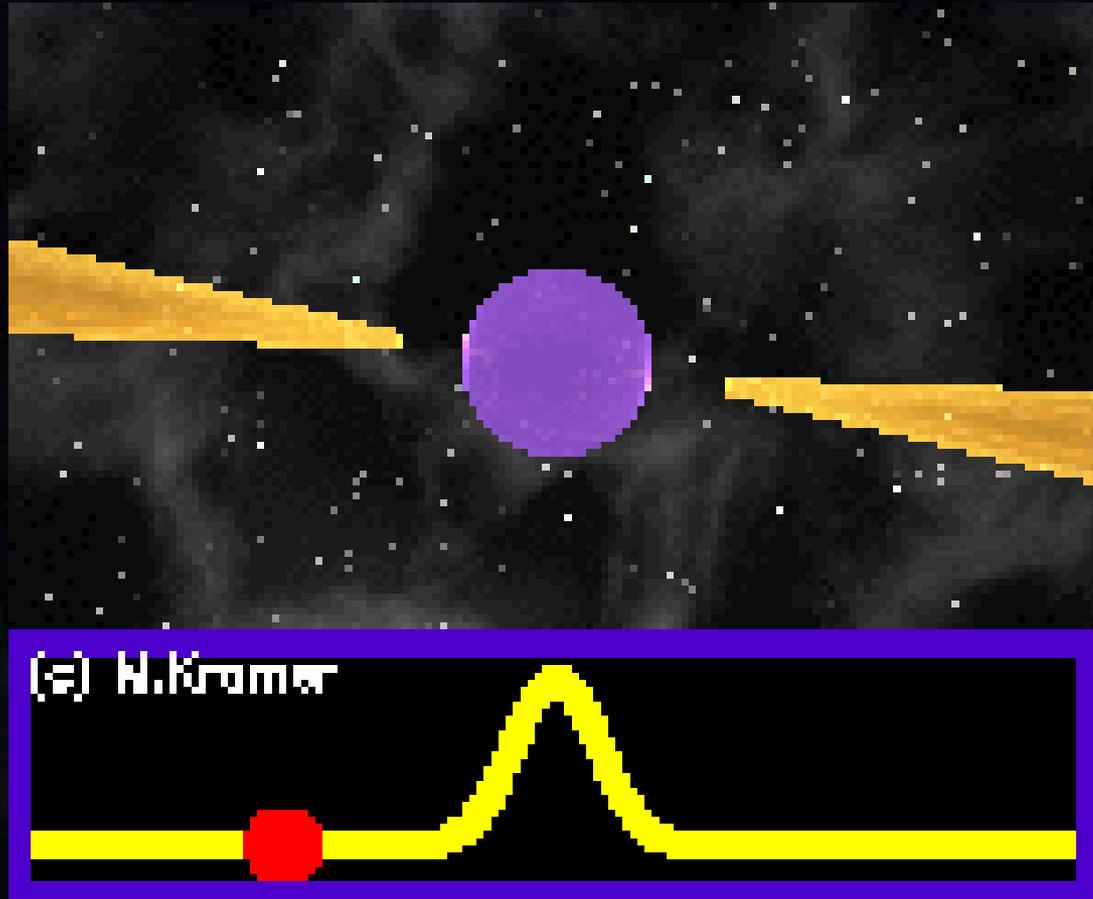
質量: パルサー 1.44 Msolar

伴星 1.39 Msolar

公転周期の変化率:

$(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$

パルサーの灯台モデル



Duncan R. Lorimer , Living Rev. Relativity 11 (2008) 8

Animation designed by Michael Kramer. <http://www.livingreviews.org/lrr-2008-8>

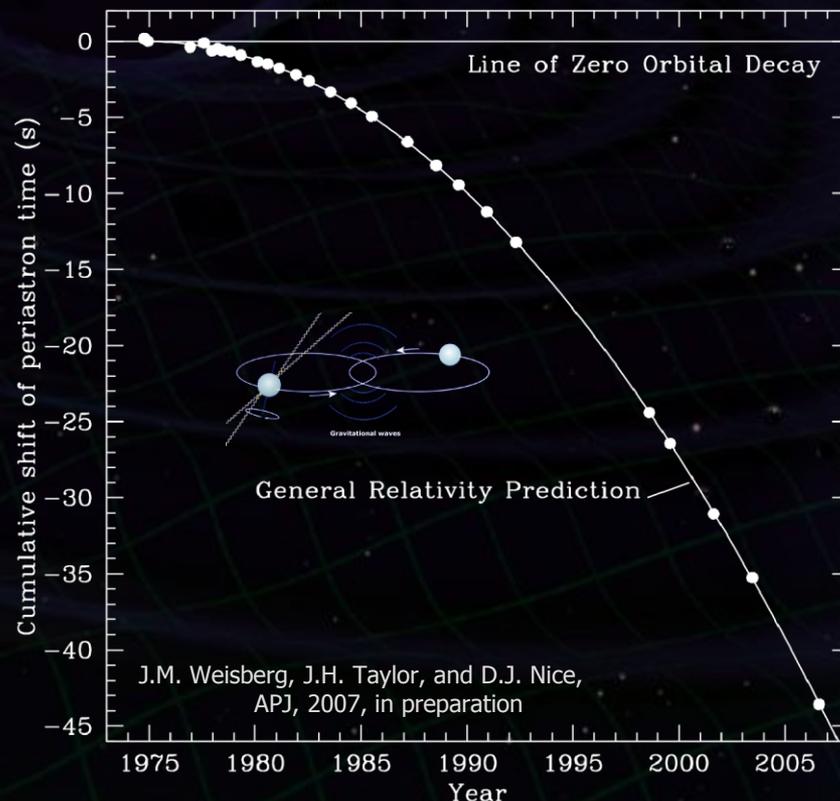
連星パルサーの軌道変化を
20年以上継続的に観測.

重力波の放出により公転エネルギー
を失い, 互いに落ち込む.

一般相対性理論による理論値
と観測された値の差は0.2%程度



重力波の存在証明



質量 : パルサー 1.44 Msolar, 伴星 1.39 Msolar
公転周期の変化率: $(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$

連星パルサーPSR B1913+16

相対性理論の正しさ, 重力波の存在
を高い精度で証明



1993年ノーベル物理学賞 テイラー, ハルス
「重力研究の新しい可能性を開いた
新型連星パルサーの発見」



The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.



Russell A. Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

- 一般相対性理論は、提唱されてから約100年間、さまざまな観測・実験によってその検証が行われてきた。
→ 現在までに全て、理論的予測と一致する結果。

- 一般相対性理論で予言された重力波についても、その存在を裏付ける観測結果が得られている。

… **しかし、重力波はまだ直接は捕まっていない。**

⇨ **「アインシュタインが残した最後の宿題」**

宇宙誕生直後 の姿を直接見る。

- 重力波望遠鏡
による新しい天文学 -



電磁波

- 光速で伝播する
電磁場の変動

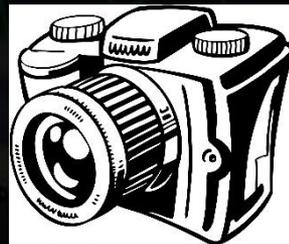


- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱



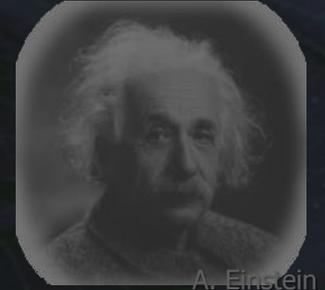
波源の各所から放射

→ 画像として観測.



重力波

- 光速で伝播する
時空の歪み

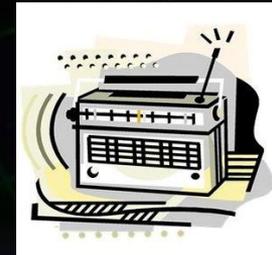


- 質量の加速度運動により生成
- 物質に対して **強い透過力**



波源全体の運動から放射

→ 時系列変動
として観測.



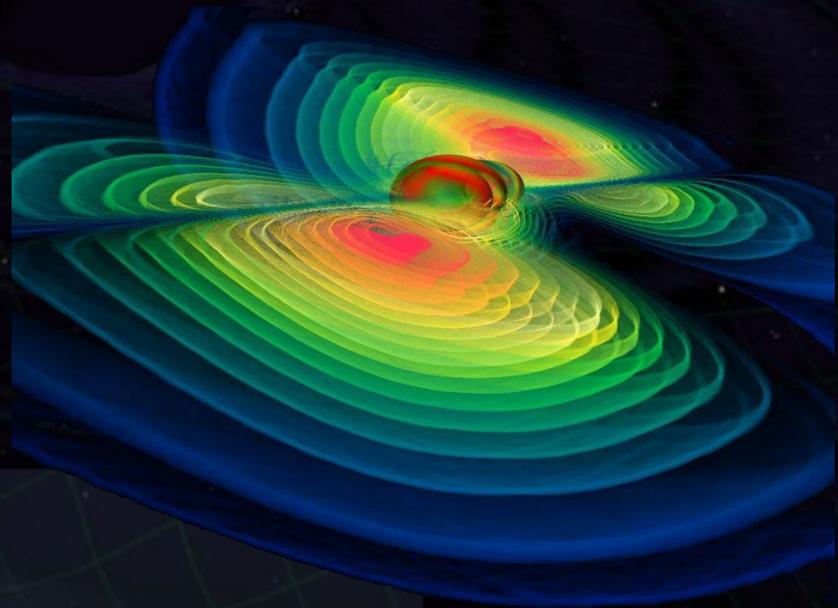
重力波の特徴

- ・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)



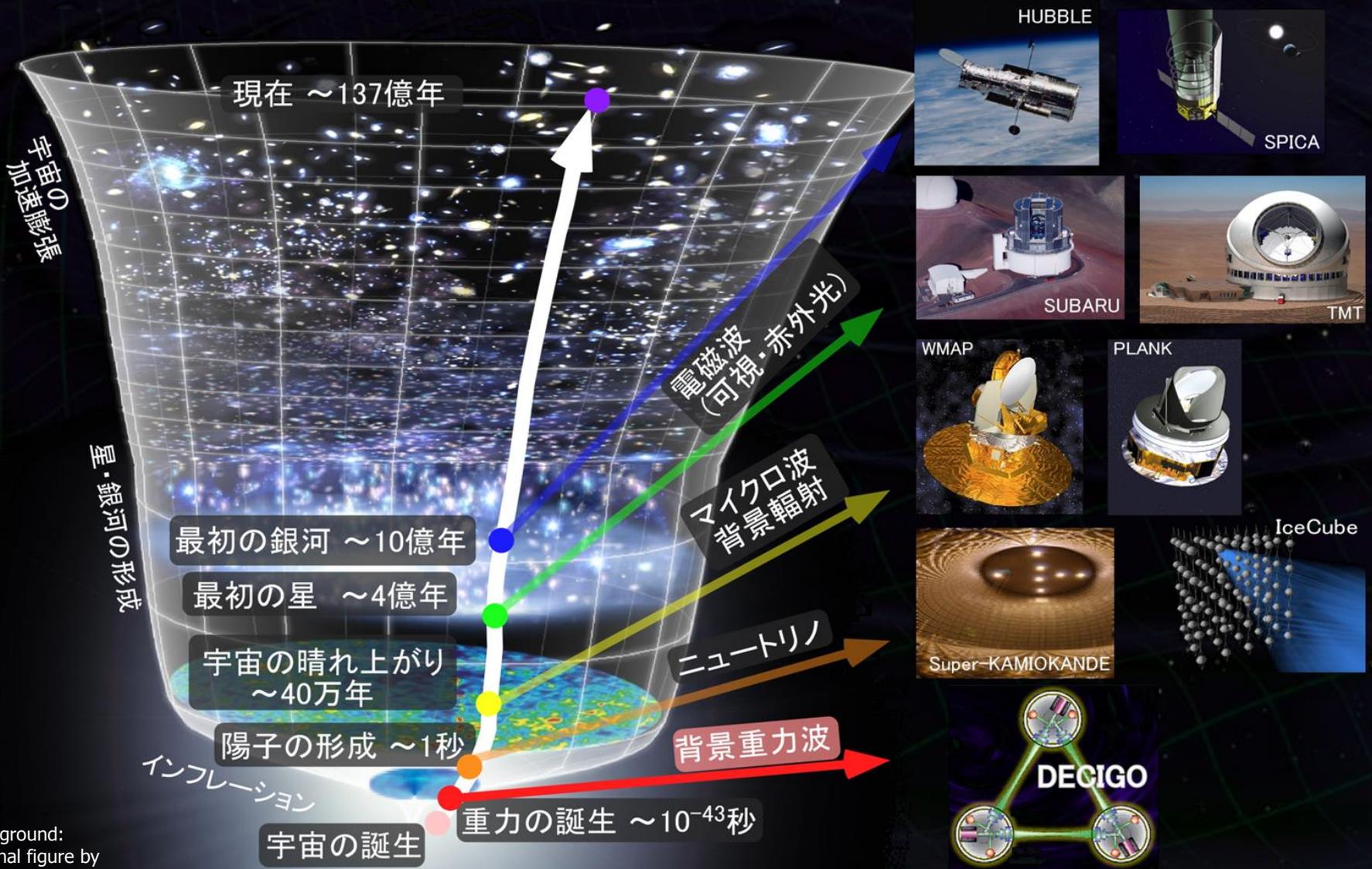
重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

主な重力波源

初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

2014年3月18日

ナショナルジオグラフィックWeb版

BICEP-2マイクロ波望遠鏡



ナショナルジオグラフィック ニュース

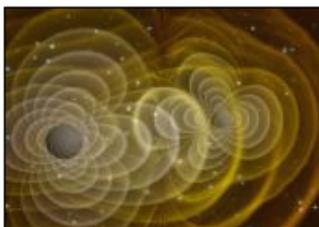
ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わり

宇宙膨張の決定的証拠を発見

ツイート 151 | チェック | いいね!

Dan Vergano,
National Geographic News
March 18, 2014

宇宙が誕生した瞬間、驚くほど強力な重力波が広がっていった事実が最新の研究によって明らかとなった。「誕生直後に急膨張した」とする「宇宙インフレーション理論」を裏付ける決定的な証拠が、初めて観測されたことになる。



写真を拡大

インフレーション理論は、初期宇宙の誕生直後から想像を絶するほどの大きさまで膨張した成り立ちを説明する進化モデルで、「火の玉の爆発で始まった」とするビッグバン理論を補完する位置付けにある。

研究チームの一員でアメリカにあるミネソタ大学ツインシティー校の物理学者クレメント・プライク (Clement Pryke) 氏は、「重力波の信号検出に初めて成功した。今回の観測結果は十分な検証を重ねており、絶対の自信を持っている」と語る。

原始重力波の観測

BICEP2, (POLARBEAR,...)

マイクロ波望遠鏡を用いた
宇宙背景放射 B-mode偏光
成分の観測.

DECIGO, (KAGRA, aLIGO,...)

レーザー干渉計重力波望
遠鏡を用いた宇宙背景
重力波の観測.



図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

2014年5月15日

ナショナルジオグラフィックWeb版

ナショナルジオグラフィック ニュース

ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わりニュース | ニュース特集 | おすすめ

“宇宙膨張の決定的証拠”は誤り？

ツイート 153 | B! | m チェック | いいね! 251 | +1 43

Dan Vergano,
National Geographic News
May 15, 2014

初期宇宙の成り立ちを説明する“決定的な証拠”が発見され、高い評価を受けていた。ところが、この発見は間違いだったのではないかという風評が広がっている。



写真を拡大

3月、ハーバード大学のジョン・コバック (John Kovac) 氏率いるBICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) 2チームが、アルベルト・アインシュタインが予言した宇宙の“重力波”の観測に成功したと発表し、世界中で話題をさらった。宇宙は誕生直後から指数関数的に膨張したという通説が裏付けられたかに思えた。

研究チームは南極の望遠鏡で観測を行い、ビッグバンの名残で

2014年9月25日

ナショナルジオグラフィックWeb版

ナショナルジオグラフィック ニュース

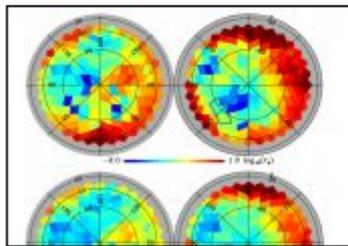
ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わりニュース | ニュース特集 | おすすめ

“宇宙膨張の証拠”、窮地に

ツイート 75 | BI | m チェック | いいね! 100 | g+ 33

Dan Vergano,
National Geographic News
September 25, 2014

観測衛星が捉えた宇宙のちりの地図が新たに発表され、先ごろ話題をさらった“原始宇宙の重力波を観測した”という報告の雲行きが怪しくなってきた。



写真を拡大

今年3月、南極にあるBICEP2望遠鏡で観測を行った物理学者のチームが、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の地図上に、驚くほど強力な重力波の痕跡を見つけたと報告した。全天に広がるCMBは、ビッグバンの余波で残った余熱と考えられている。

BICEP2チームは、宇宙のごく狭い領域におけるCMBの温度のゆらぎの中に、時空の織物の“さざ波”という形で、重力波の強力な信号が見られると報告していた。こうしたさざ波の検出は、約138億年前に起こったビッグバン直後に宇宙が急激な膨張したと

重力波の直接検出

⇨ 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 -



重力波の効果

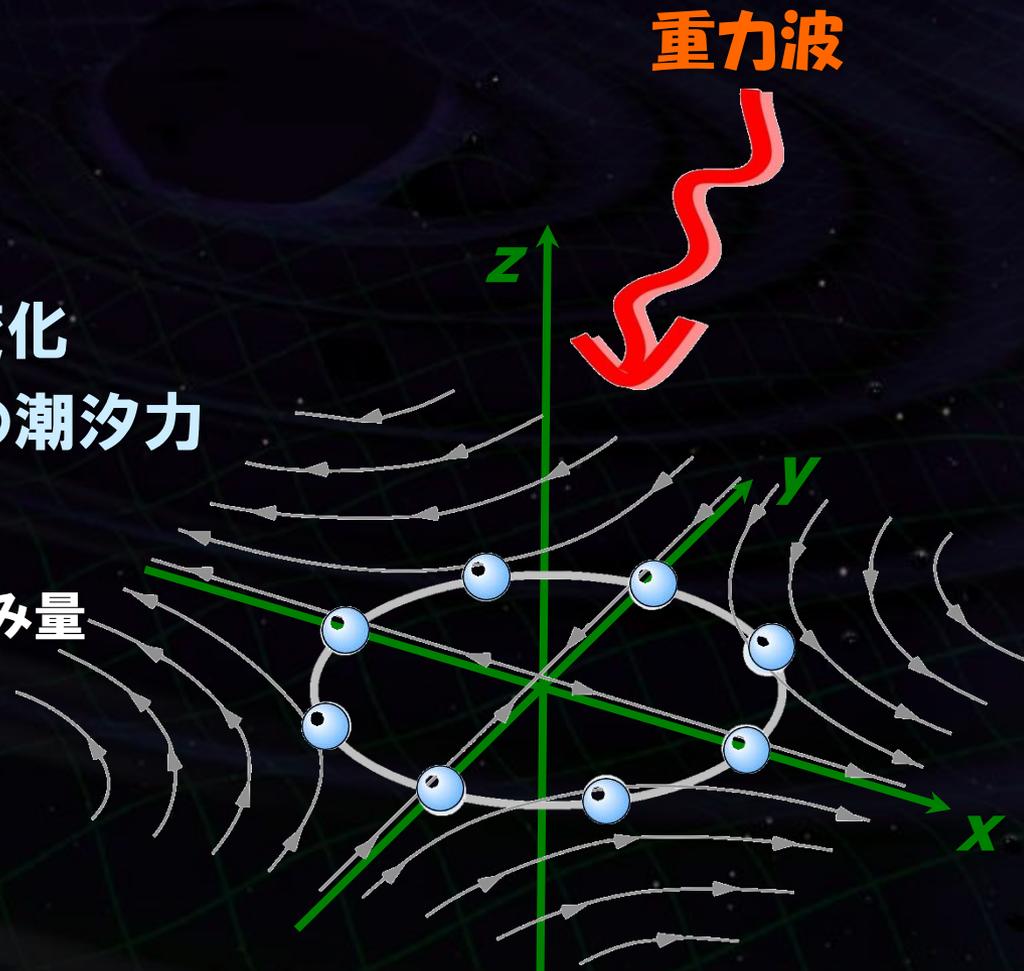
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

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

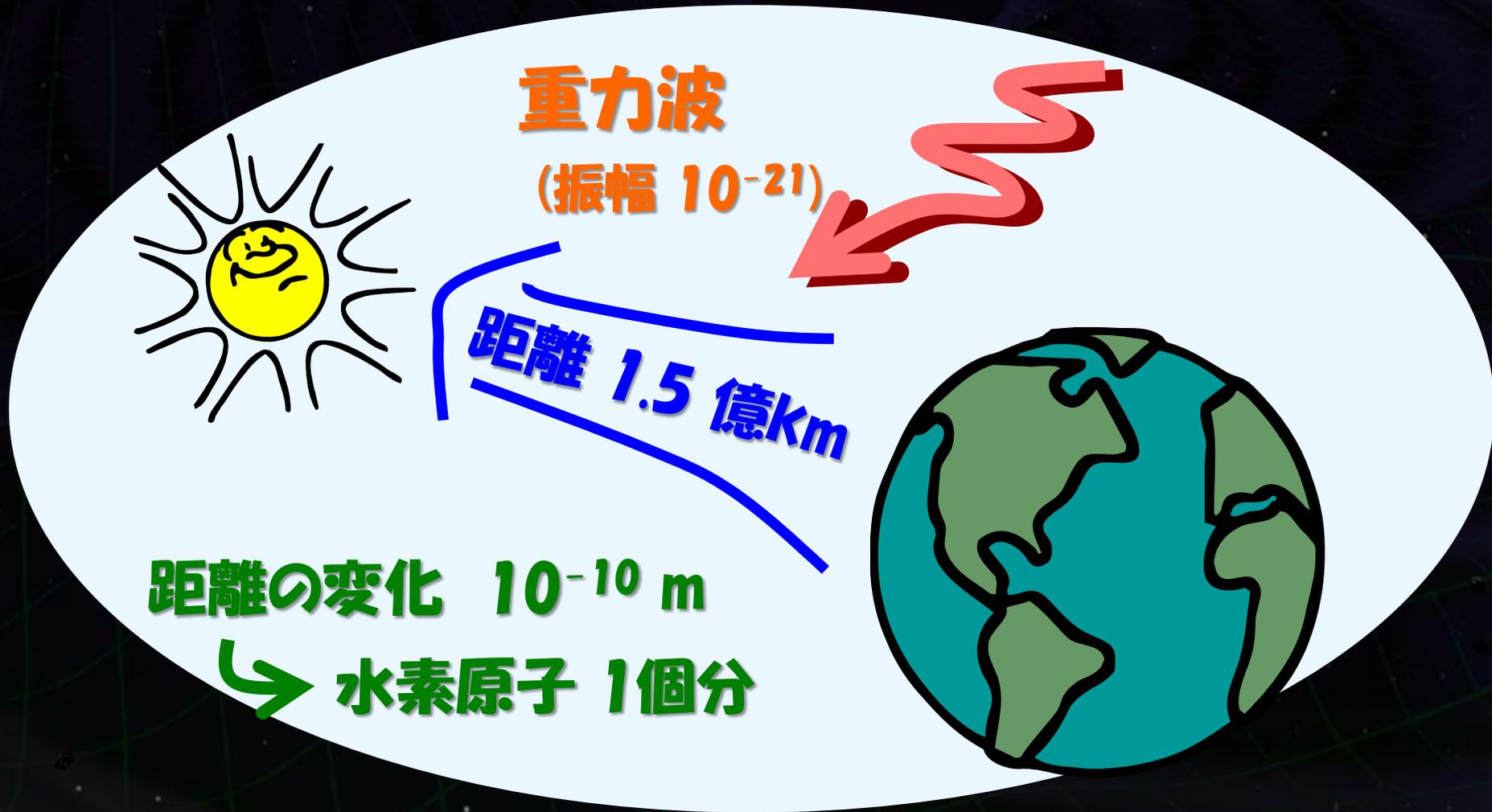
δL : 距離変動

L : 2点間の距離



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

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

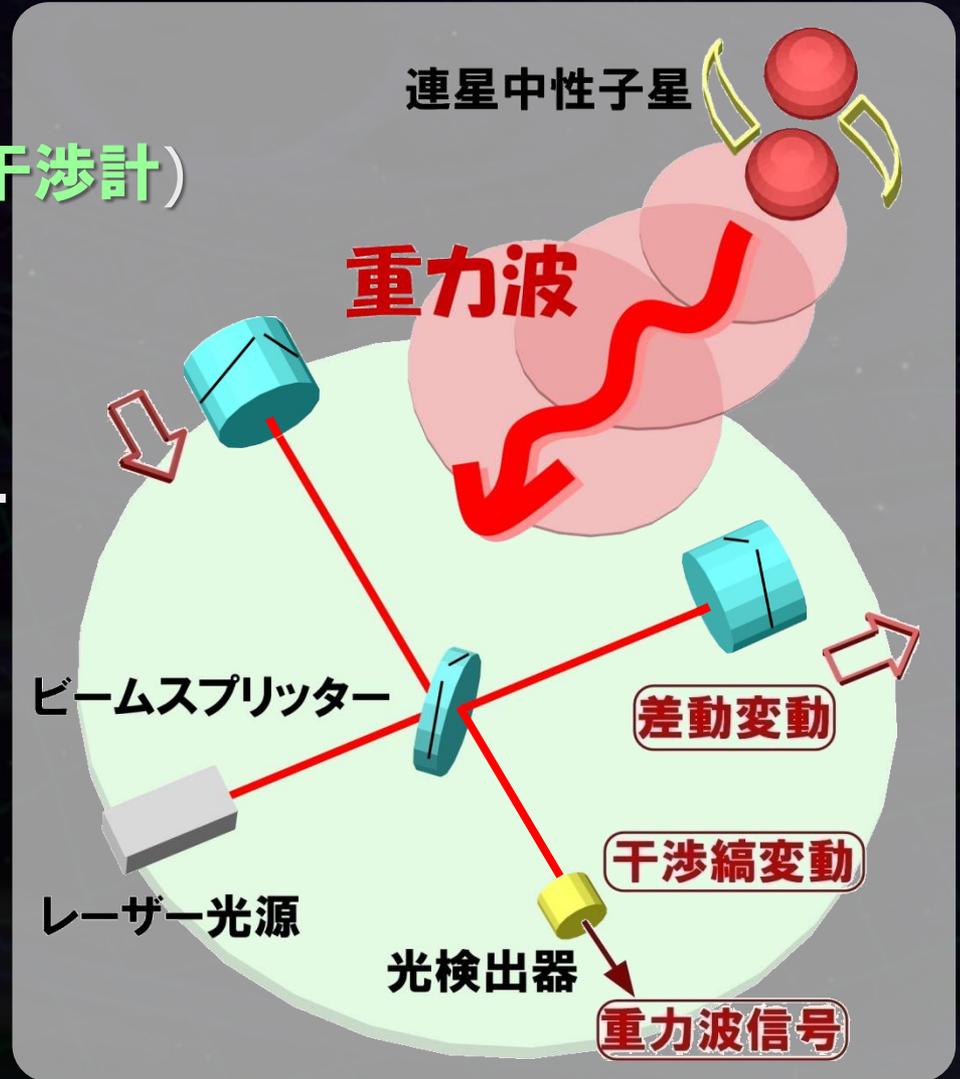
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- 鏡が試験マスの役割.
- 直交する2方向での光の往復時間の差を精密に測る.

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

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

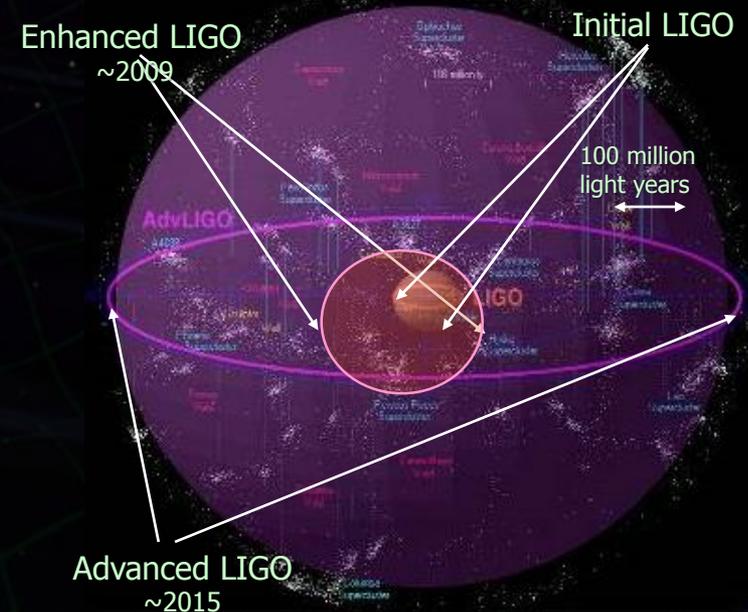
高感度化⇒より多くの銀河をカバー

(重力波の振幅) $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上

→ 検出頻度は 10^3 倍

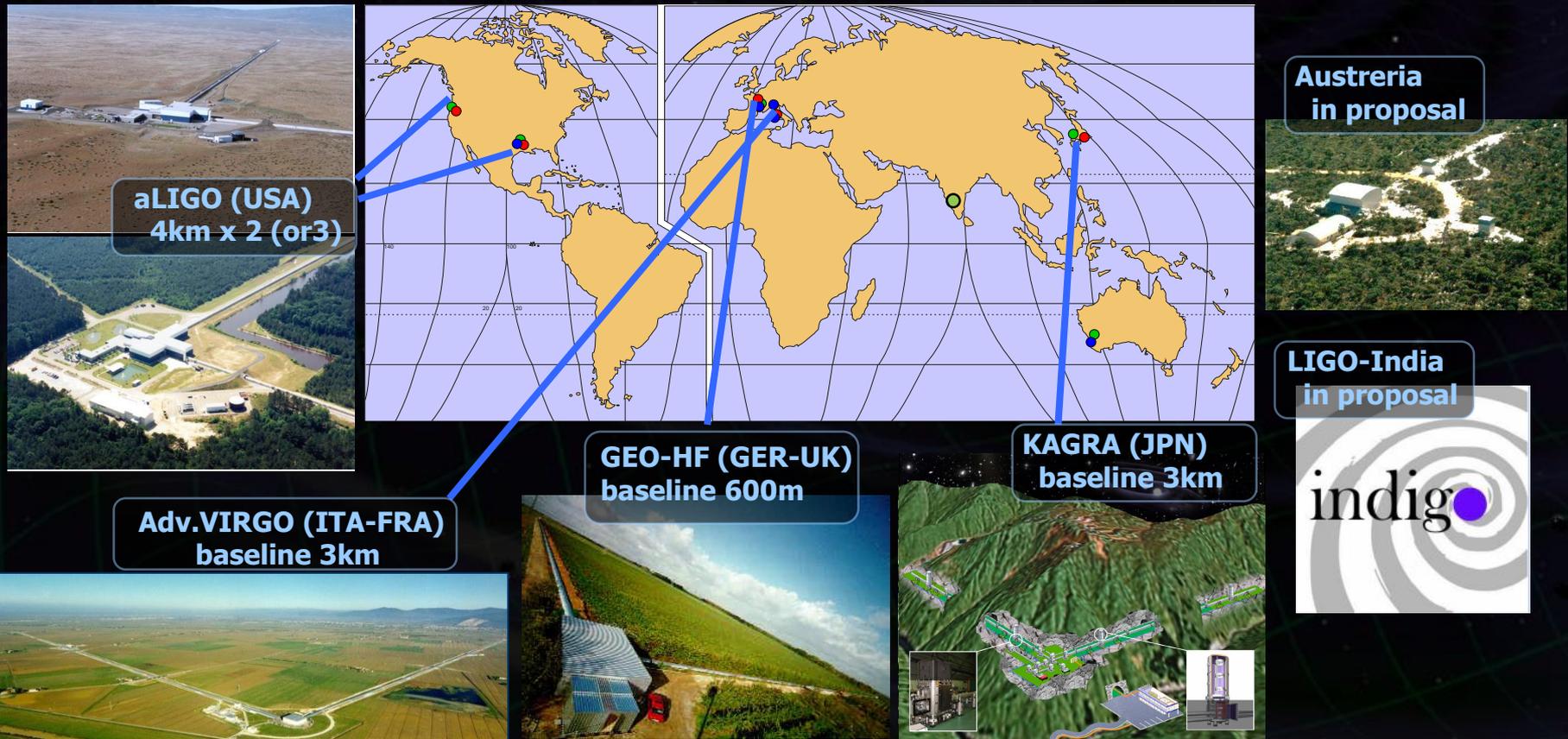


第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

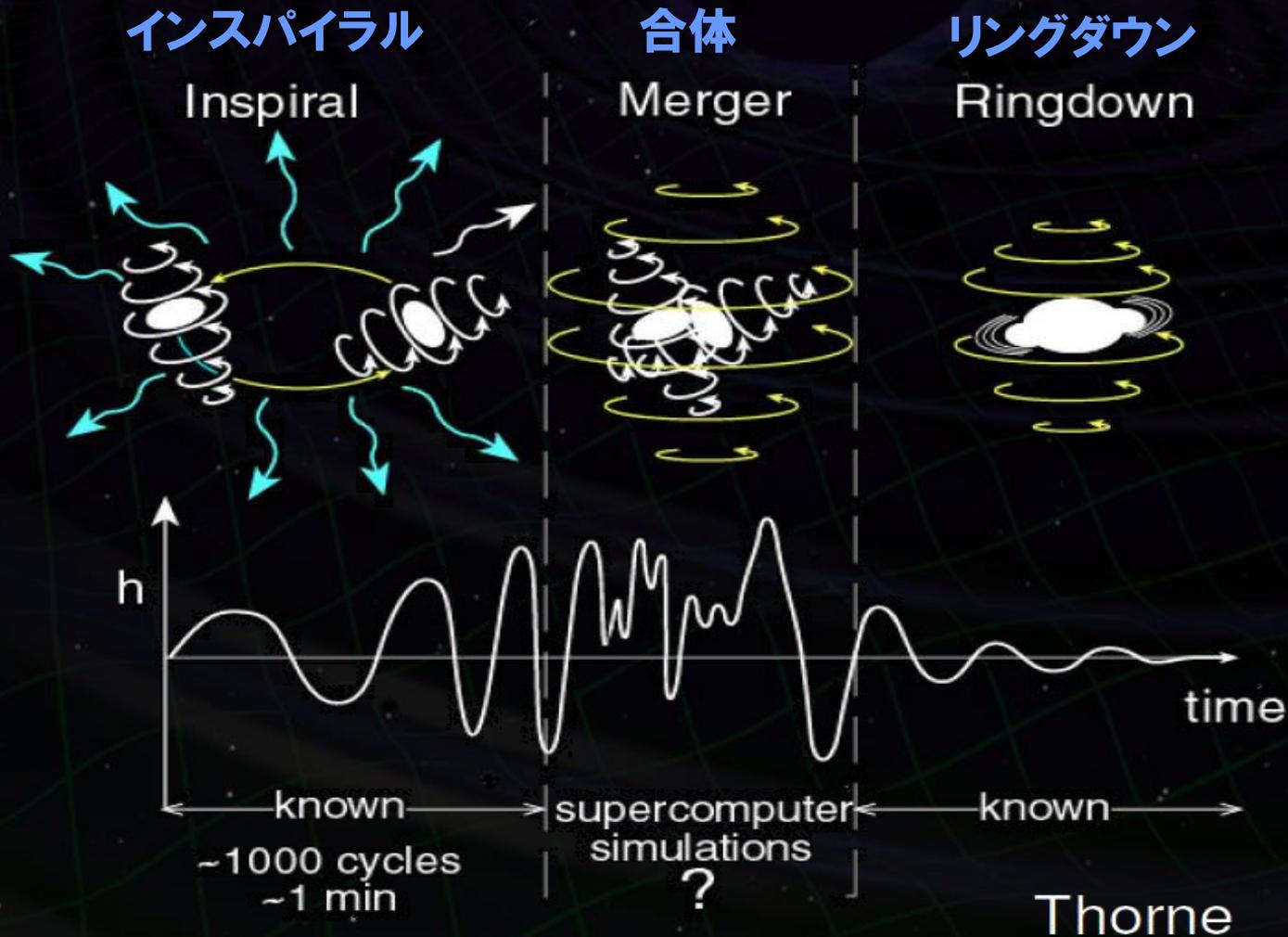
第2世代 重力波望遠鏡

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, ...)



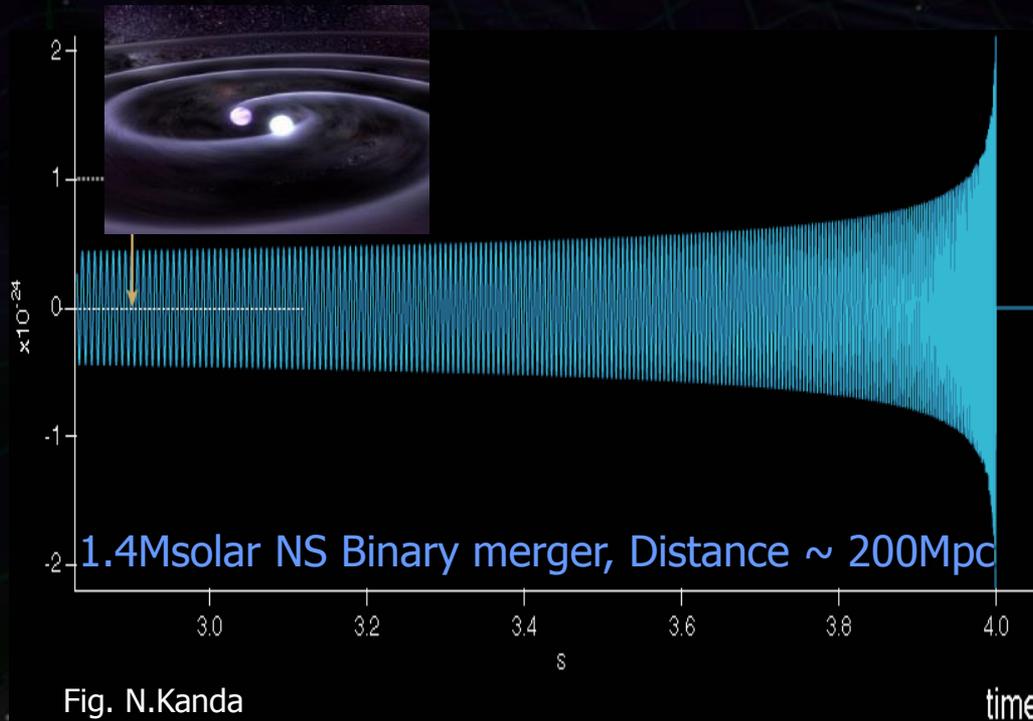
連星合体現象からの重力波



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.



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。

• 大型低温重力波望遠鏡 LCGTに愛称.

(Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

かぐら KAGRA

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



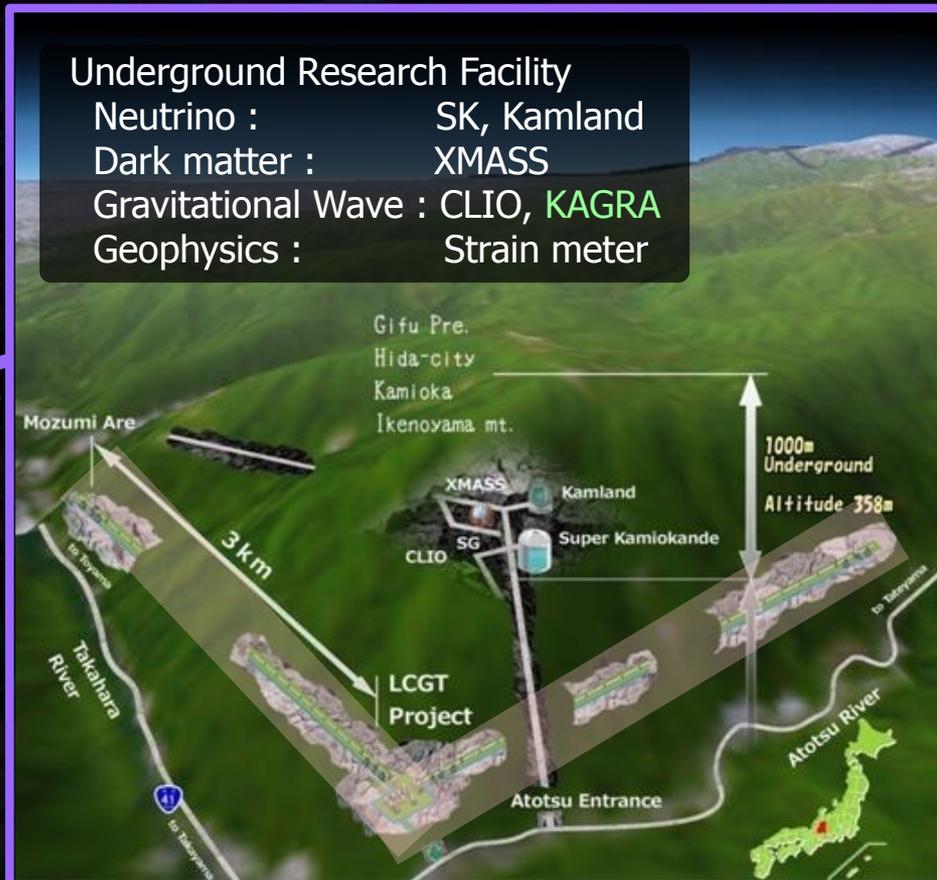
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

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

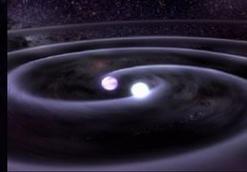


- Underground Research Facility
- Neutrino : SK, Kamland
- Dark matter : XMASS
- Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**
- Geophysics : Strain meter

重力波望遠鏡の高感度化

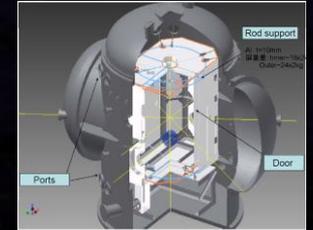
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



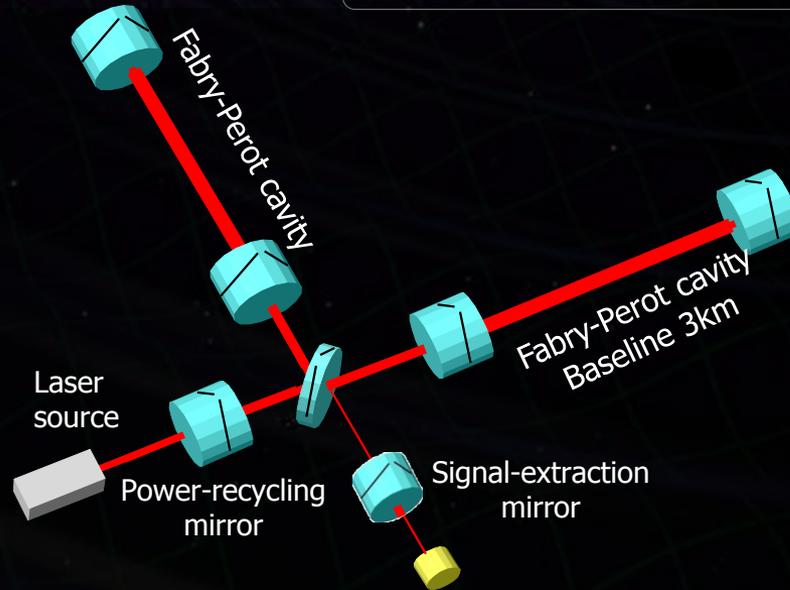
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



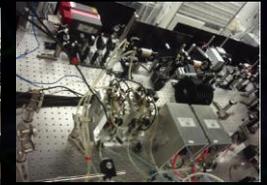
・地面振動の影響

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

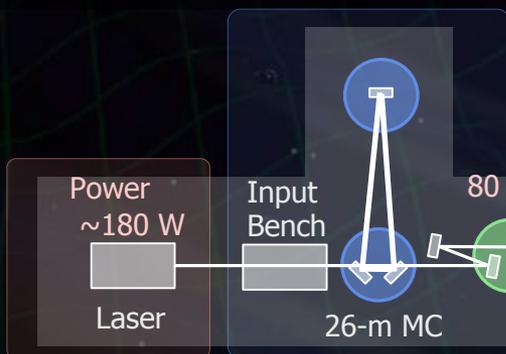
デジタル制御・データ取得系
環境モニタ, データ保管・分配



KAGRA 干渉計構成

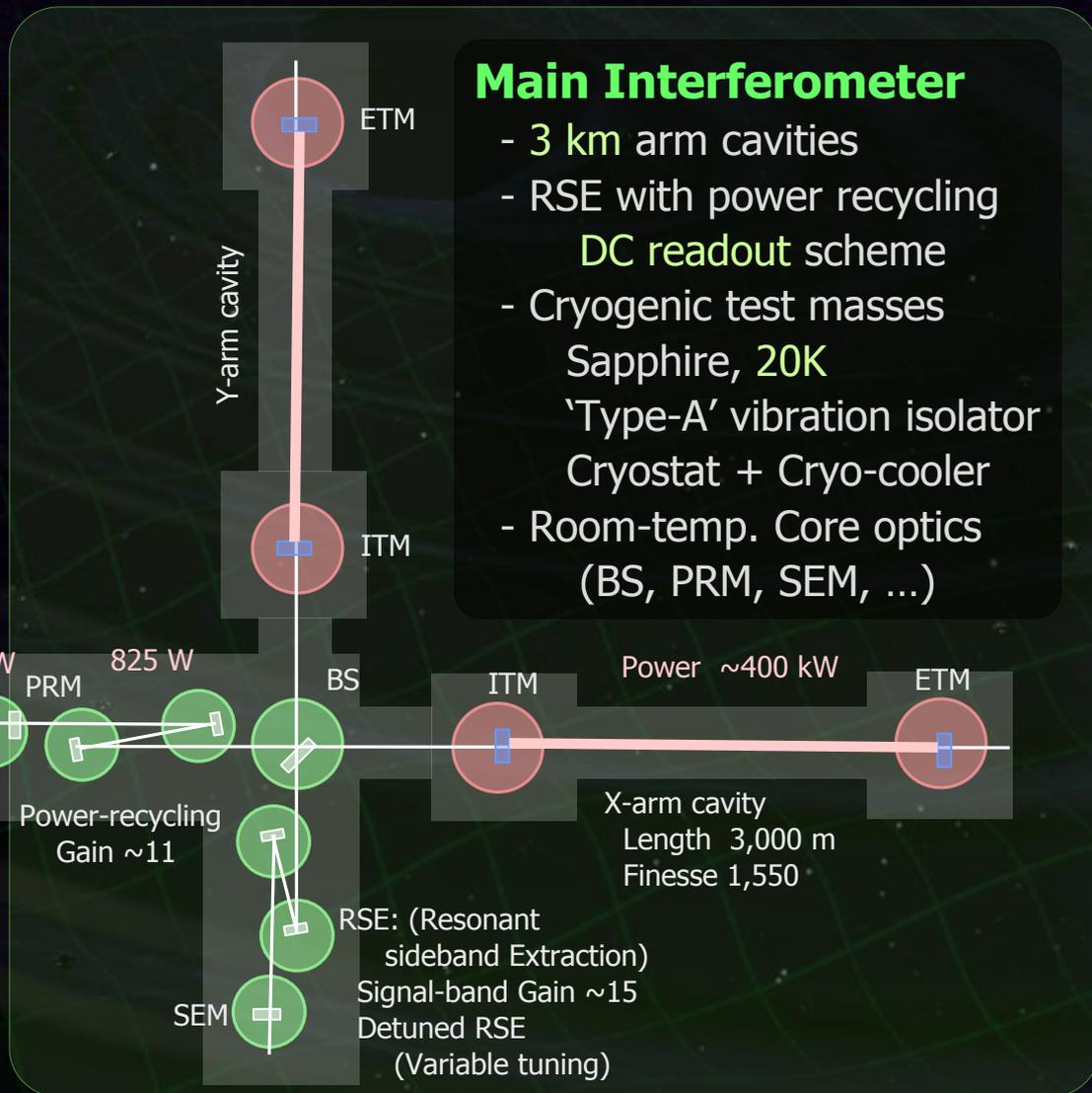
Input/Output Optics

- 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

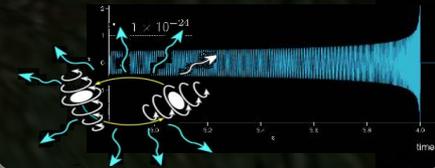


15サブシステム

- Tunnel
- Facility
- Vacuum system



- Data Management
- Data Analysis
- Geophys. IFO



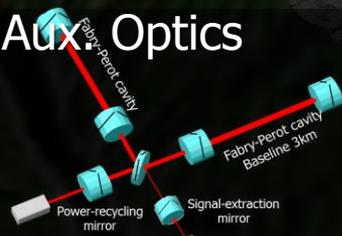
- Laser source
- Mirror



- Seismic iso.
- Cryogenic sys.



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



- Analog Elec.
- Digital Elec.

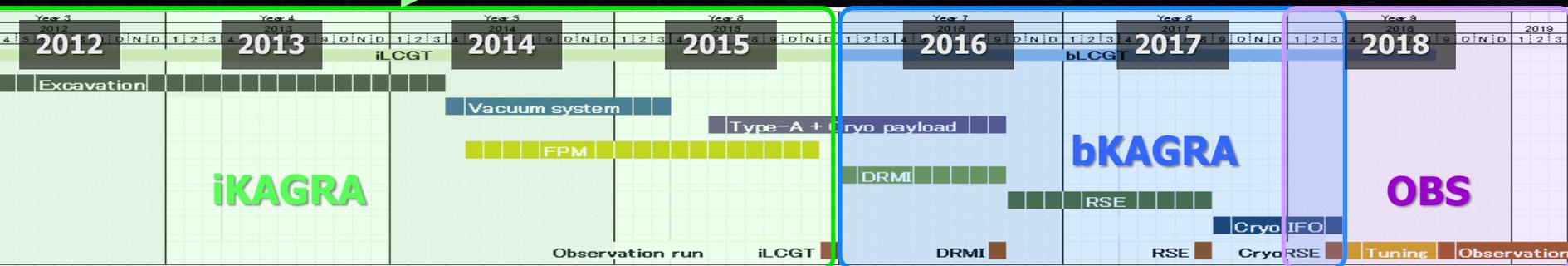
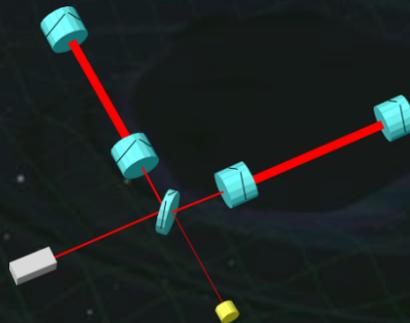


KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

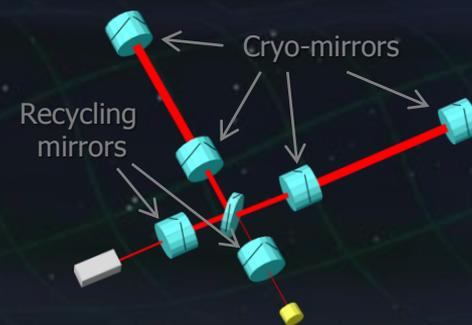
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.

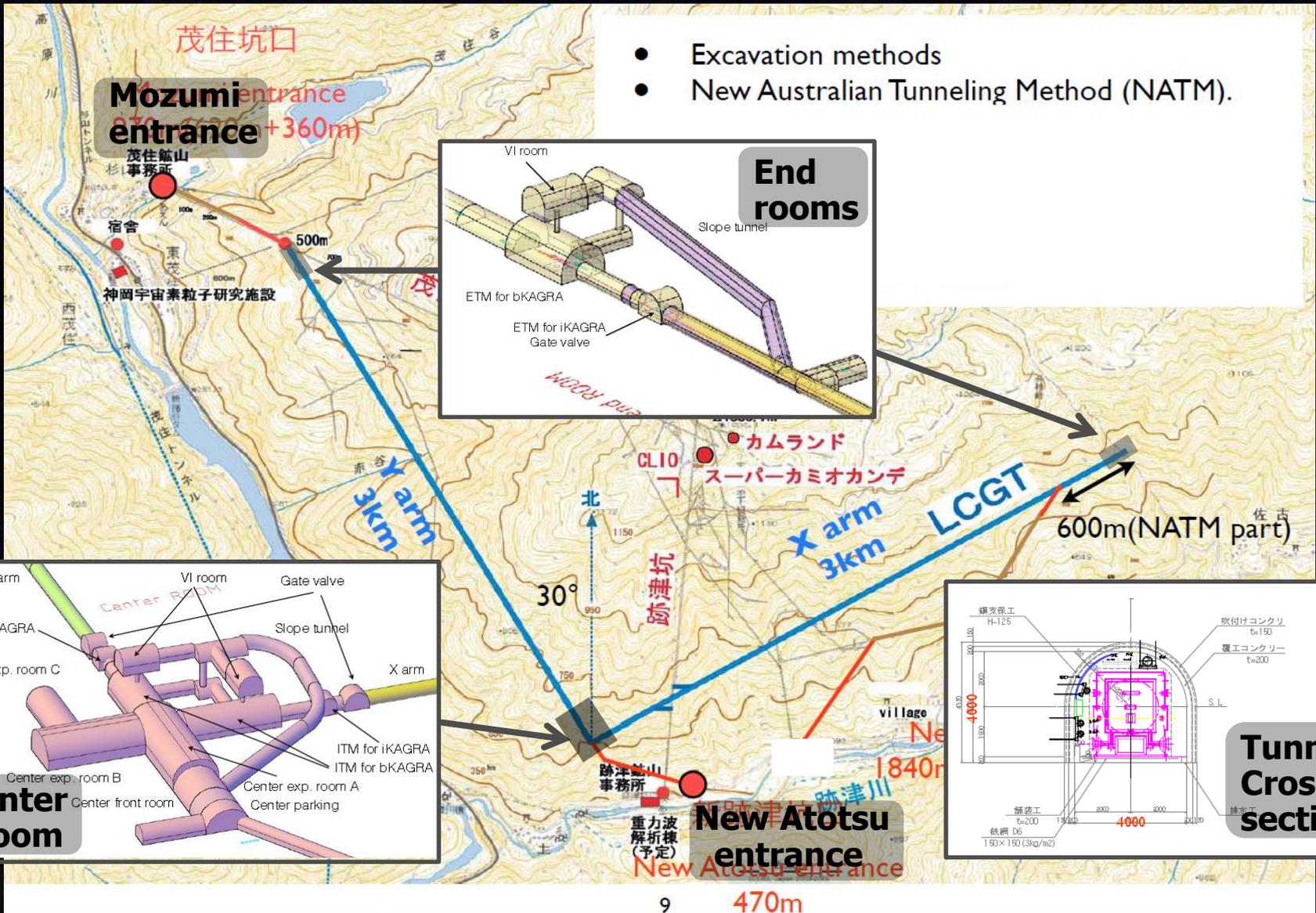


望遠鏡建設中!!!

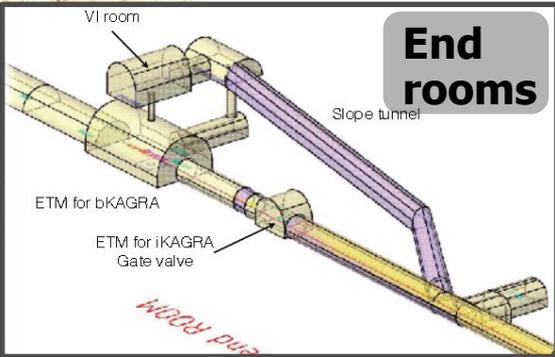
- KAGRAの現状 -



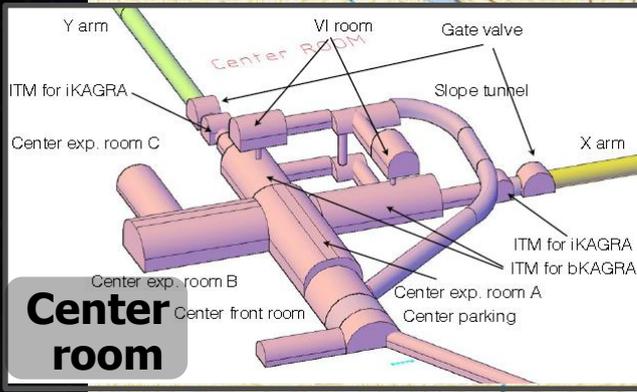
KAGRAトンネル設計



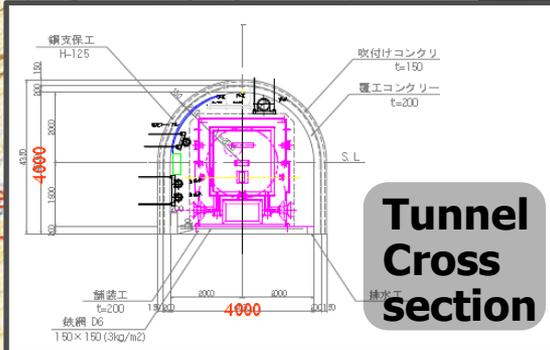
- Excavation methods
- New Australian Tunneling Method (NATM).



End rooms



Center room



Tunnel Cross section

掘削工事の現状

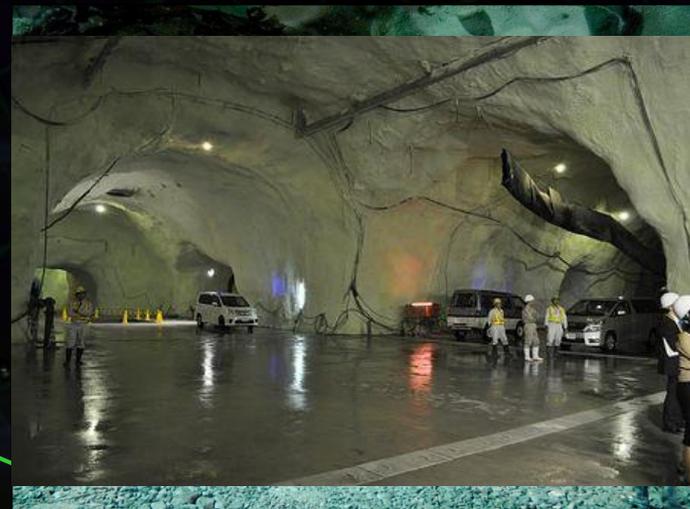
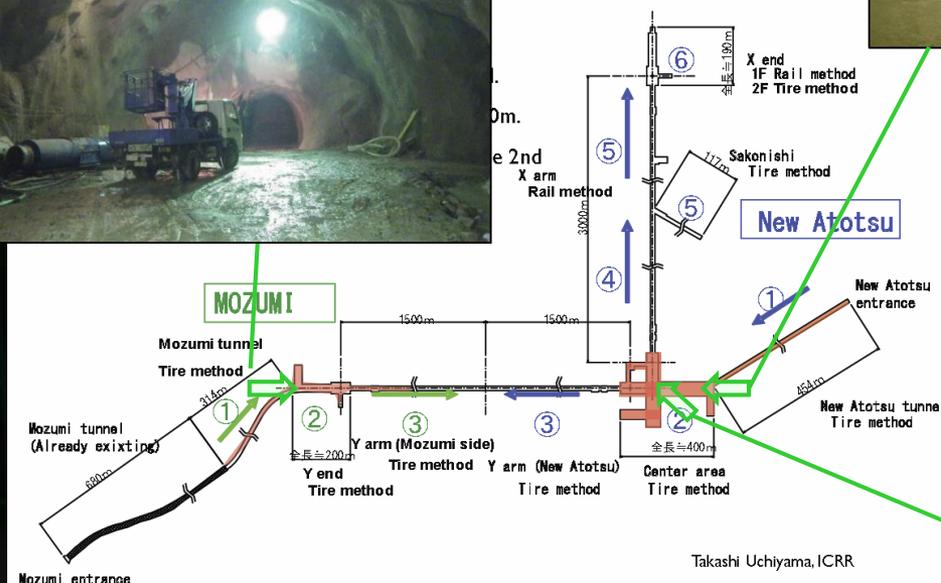
茂住口：
Y腕トンネル



新跡津口：センタールーム

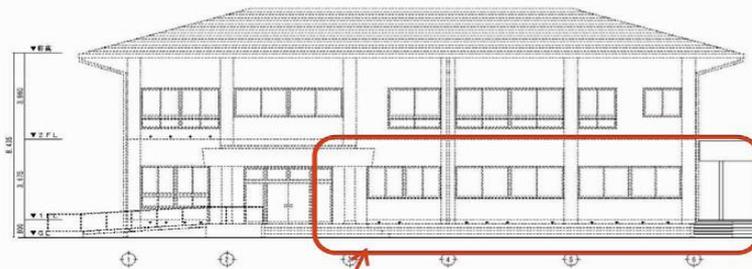


Report for the KAGRA
2012/12/17. JGW-G12



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)



New office building under construction.
To be completed in March 2014(340m²).

真空ダクト

3km x 2本の真空ダクト：

12m, $\Phi 800\text{mm}$ を478本接続。 → 間もなくインストール開始。



Press to form a duct



Bellows for each duct



Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka



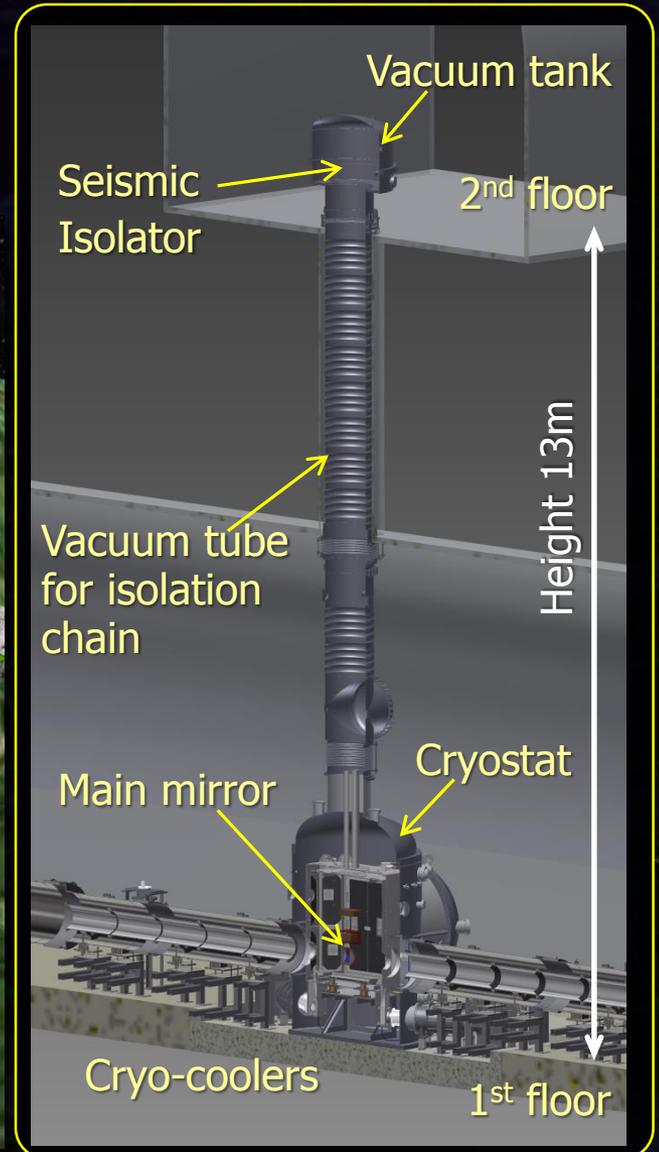
Test at MIRAPRO Co. Noda



Transportation to Kamioka

Presentation
By Y.Saito (KEK)

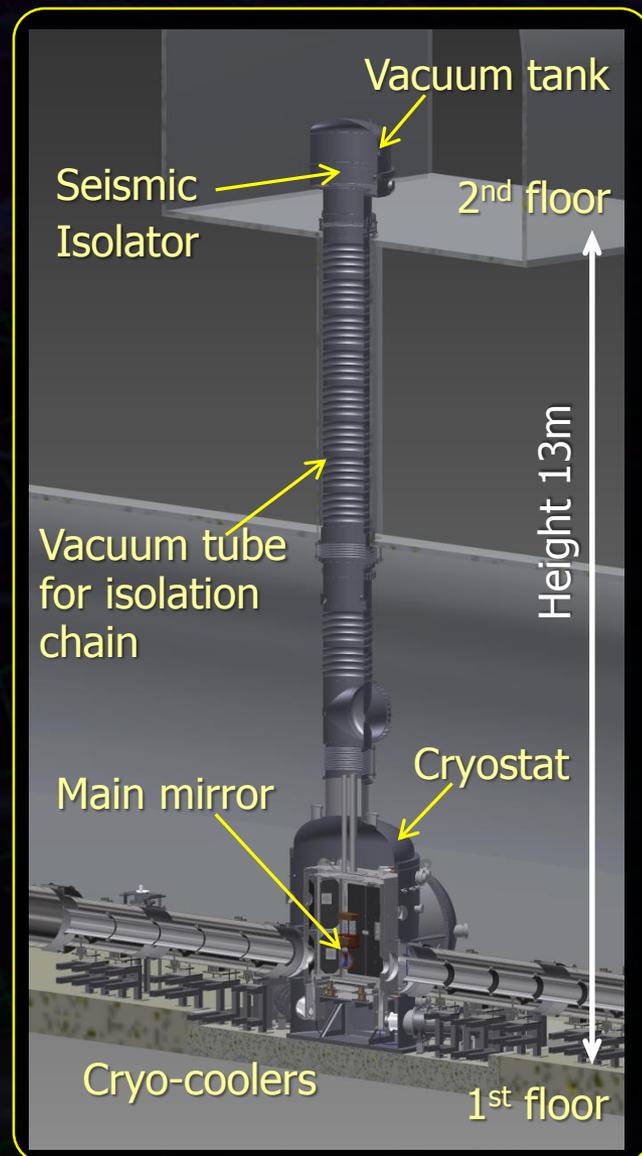
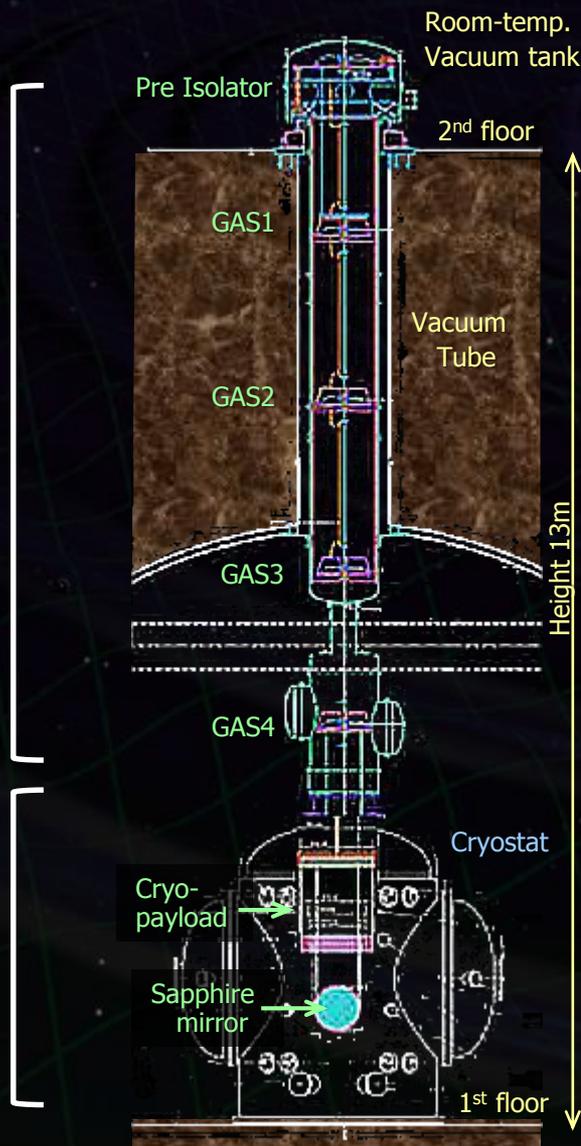
鏡の防振・冷却



低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.
Filter chain

Cryogenic
Payload



低温クライオスタット



Cryostat #1 in preparation for installation of radiation shield.

Toshiba Keihin Factory (Oct 31, 2012)

Cryostat #2 under leak test.

Inside the Rad. Shield

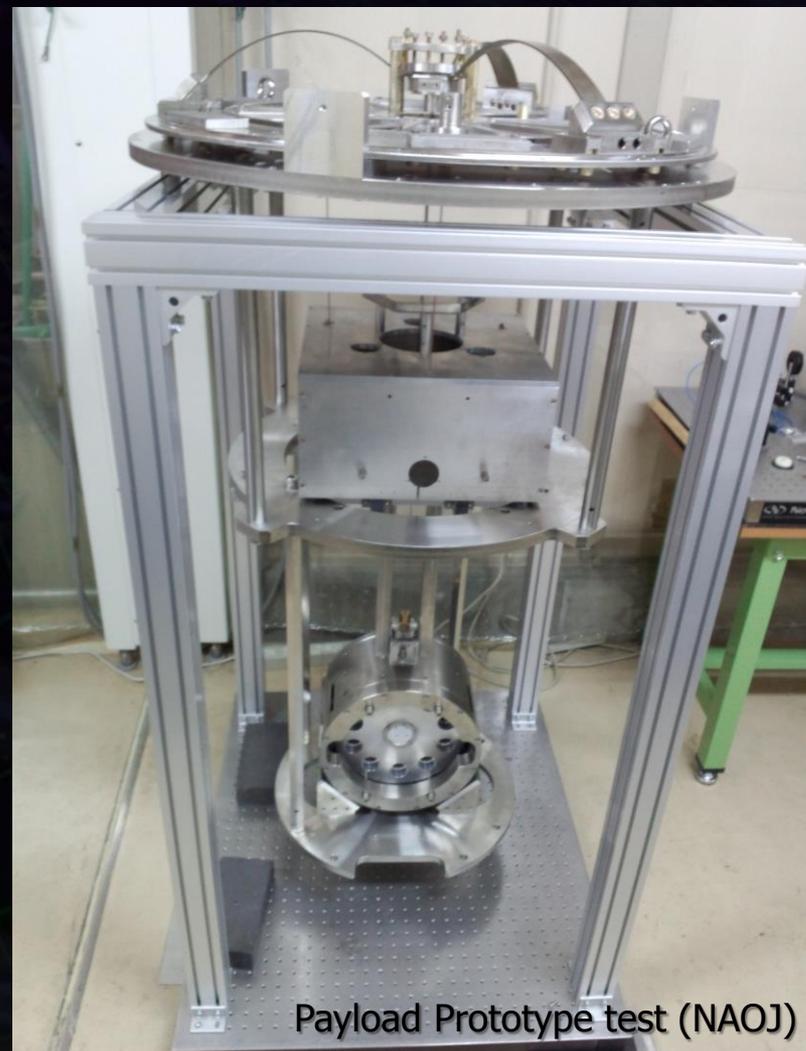


Cryo-cooler unit

防振装置



Pre-Isolator Prototype test (Kashiwa → NAOJ)



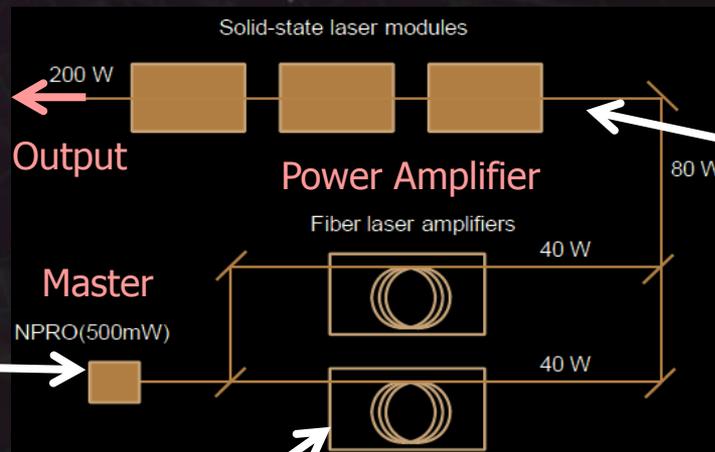
Payload Prototype test (NAOJ)



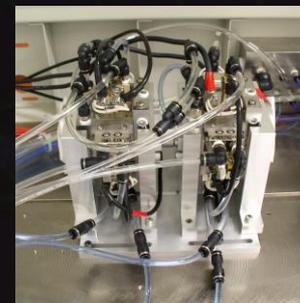
2 Sapphire substrates were delivered
($\Phi 220\text{mm}$, $t 150\text{mm}$, c-axis)

KAGRA用の光源：出力180WのNd:YAGレーザー MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 方式

マスターレーザー
Nd:YAG, 500mW
NPRO方式固体レーザー



固体レーザーアンプ
市販モジュール 50W
側面励起方式



ファイバーアンプ
市販モジュール 40W
単モード, 偏波面保存

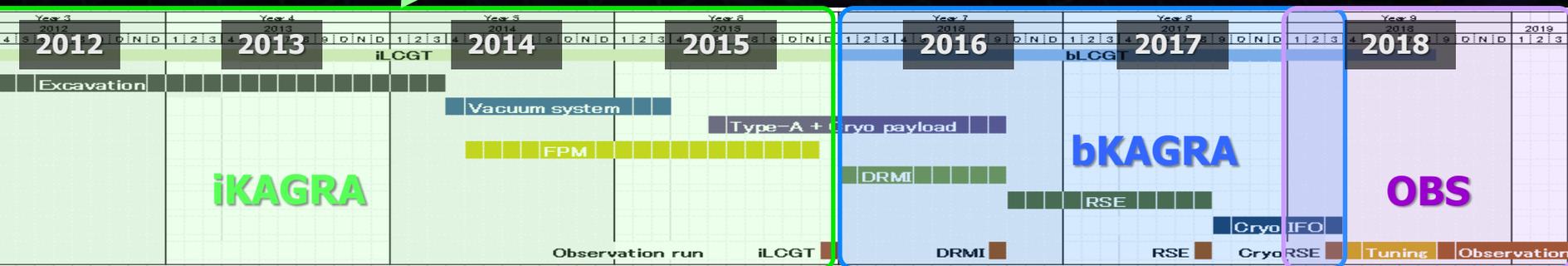
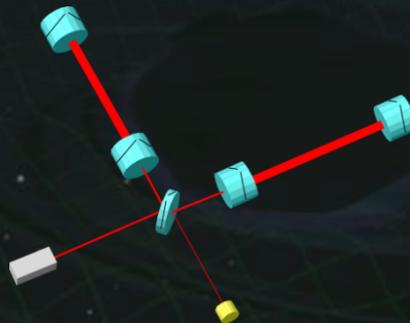


KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

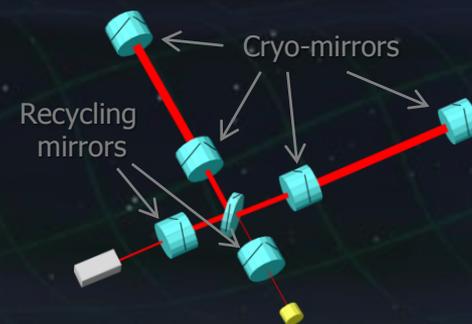
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

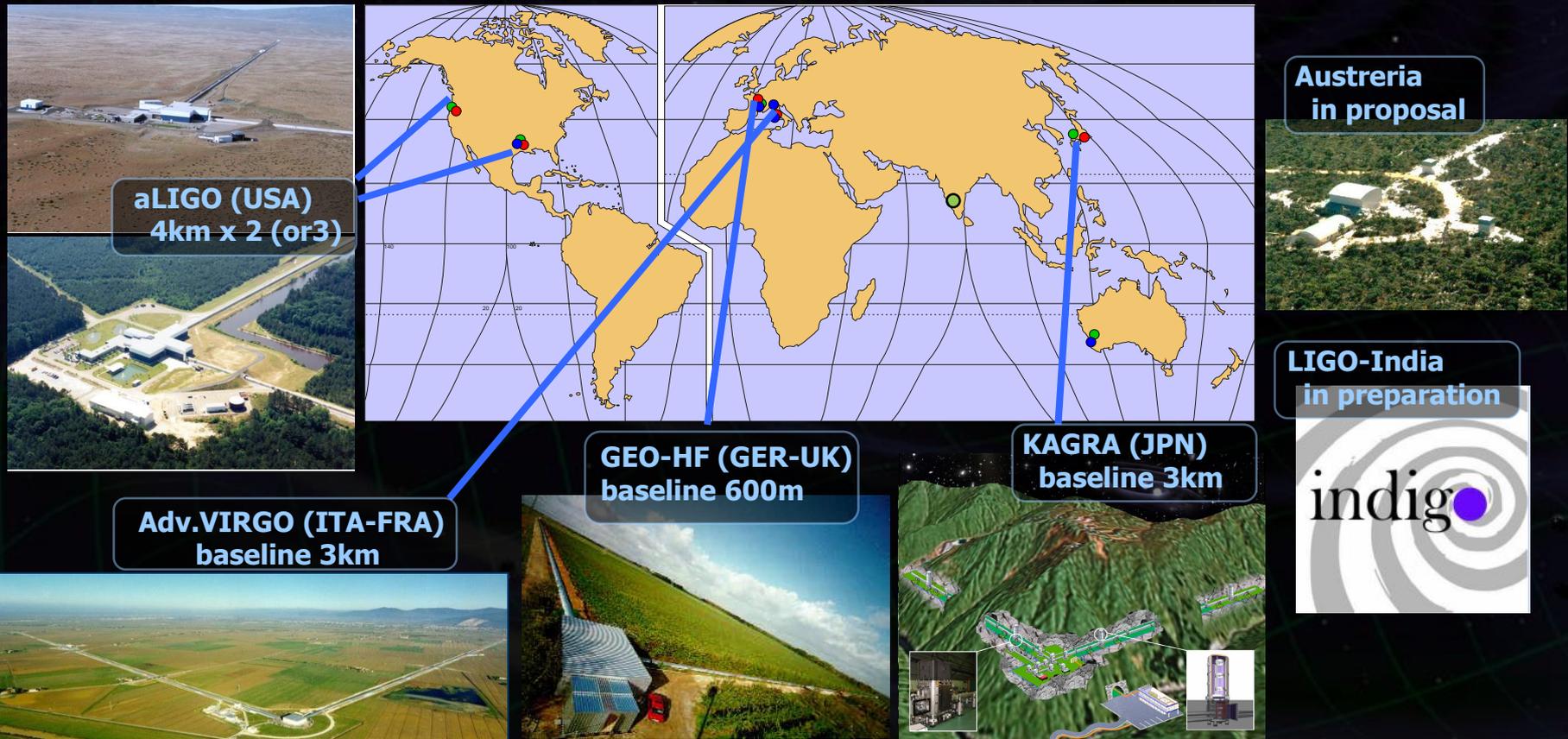
- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



第2世代 重力波望遠鏡

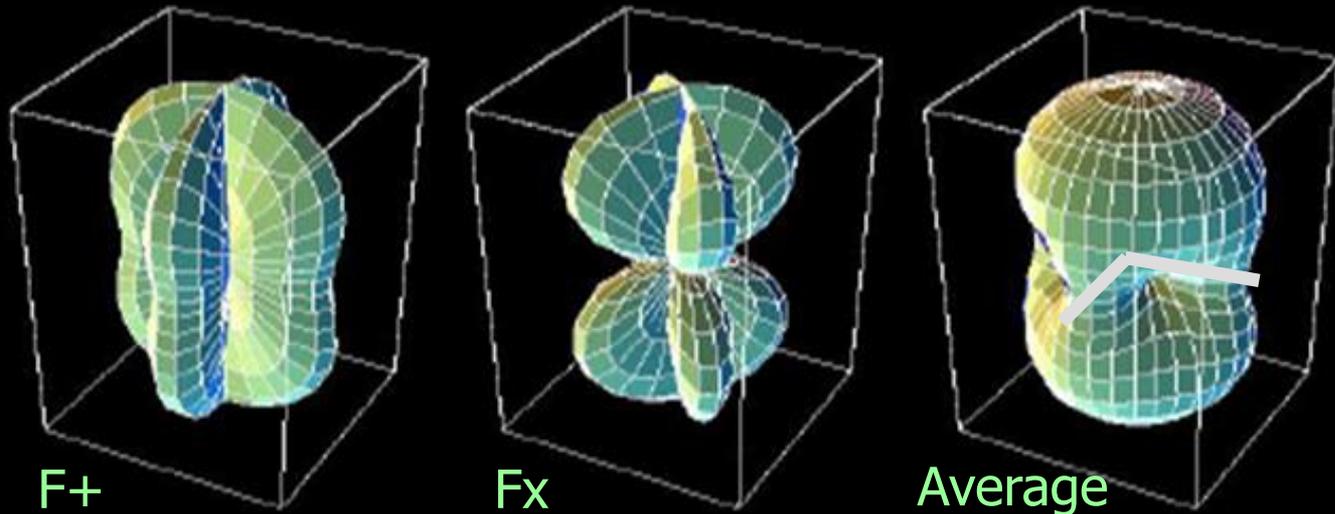
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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

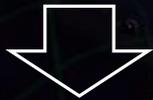


⇒ 1台の干渉計で重力波源を特定することはできない.

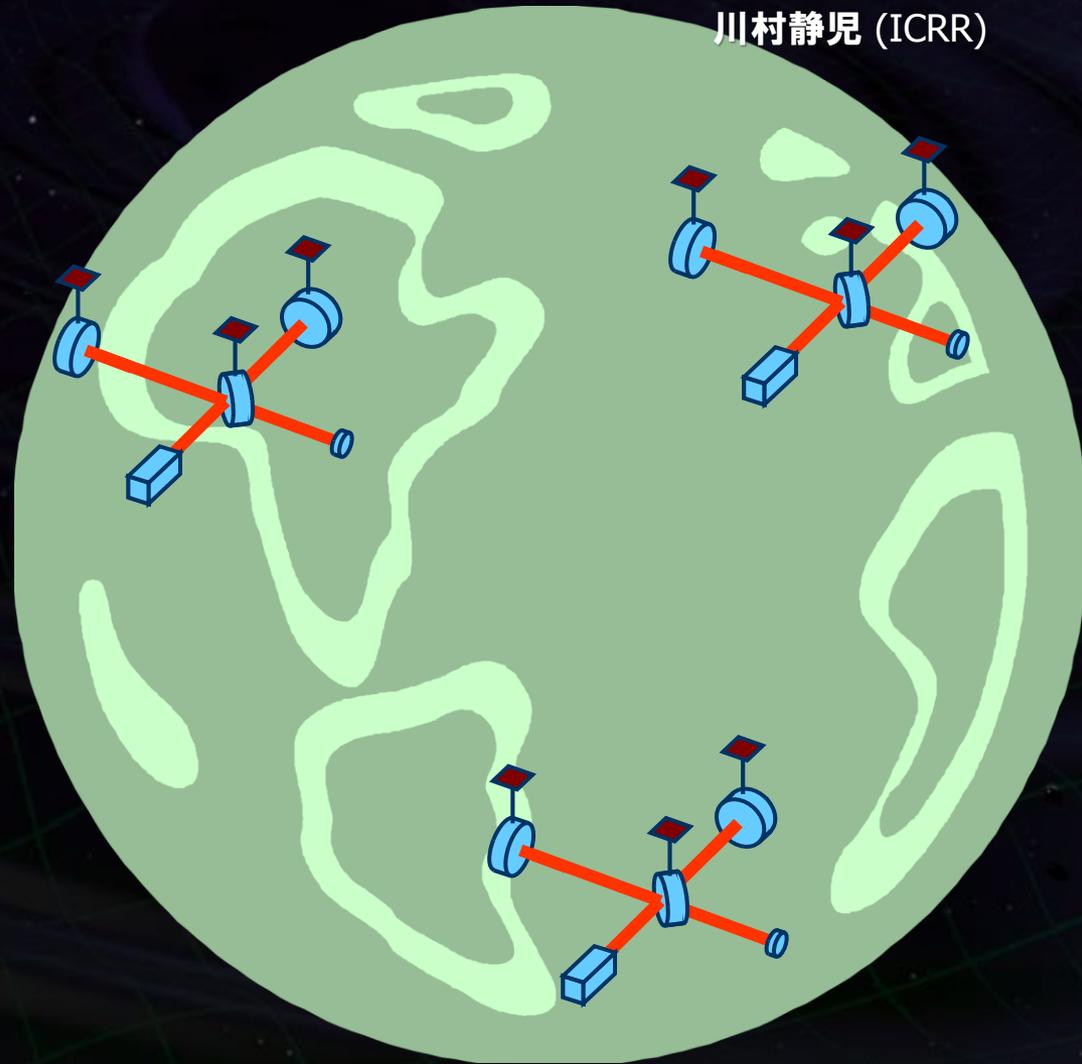
国際観測網での同時観測

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！

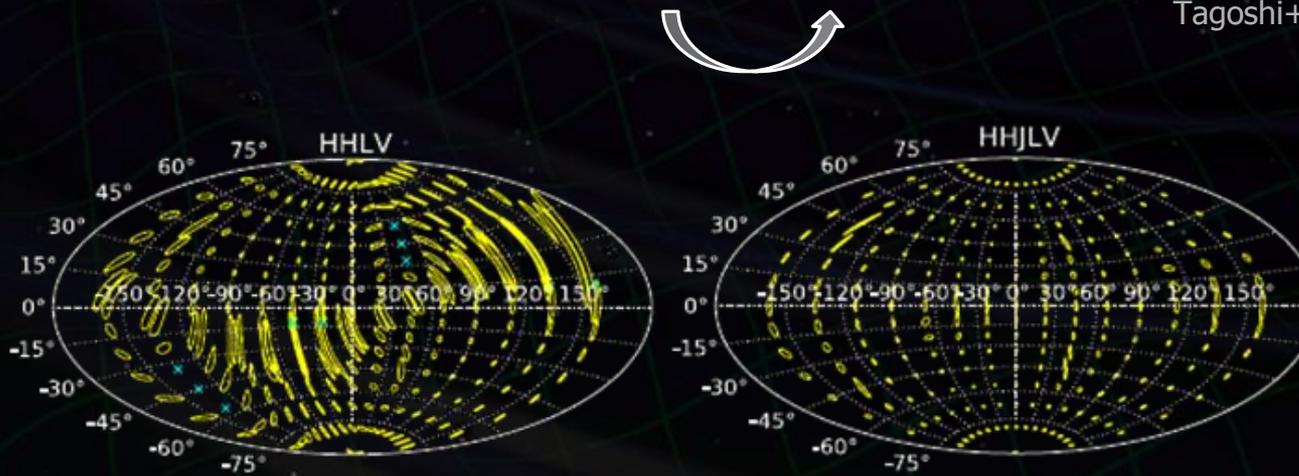


天球上の角度分解能

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 ~3-4 improvement in sky area

KAGRA (~2017)

Ground-based Detector

→ 高周波数の重力波イベント

目標: 重力波の検出, 天文学

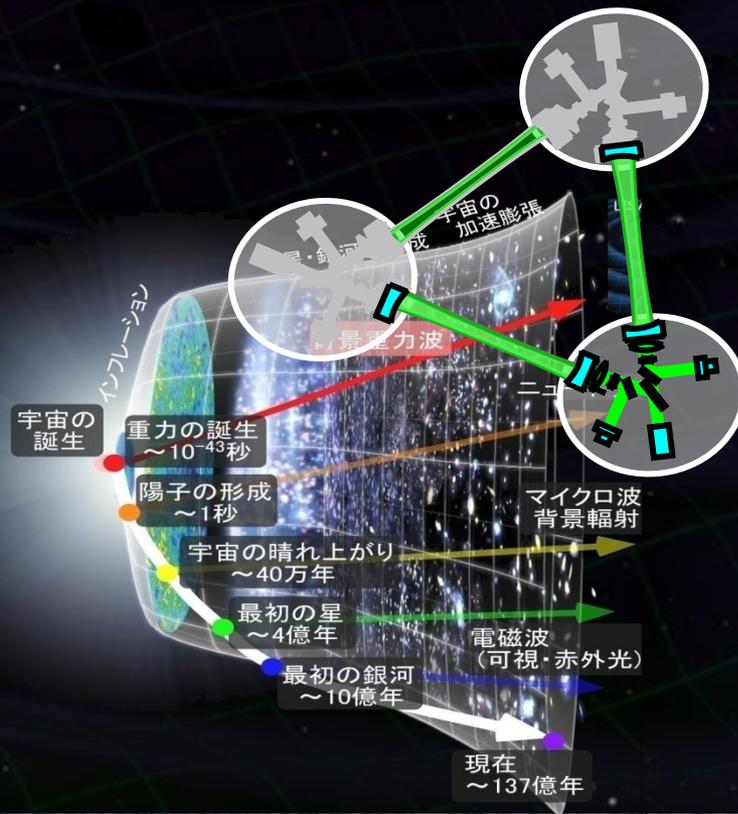


DECIGO (~2030)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 宇宙論的な知見など



まとめ

- 重力波の存在が一般相対性理論で予言されてから約100年経つが、まだその直接検出はされていない。
「**アインシュタインの最後の宿題**」
- 約50年間の努力の積み重ねの結果、**重力波望遠鏡 KAGRA**による重力波の直接検出が目前に迫っている。
- 「**重力波天文学**」により、宇宙誕生直後の姿など、これまで見ることができなかった宇宙の姿を観測することが可能になるだろう。

終わり

宇宙重力波望遠鏡計画

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Obs. band around 1mHz

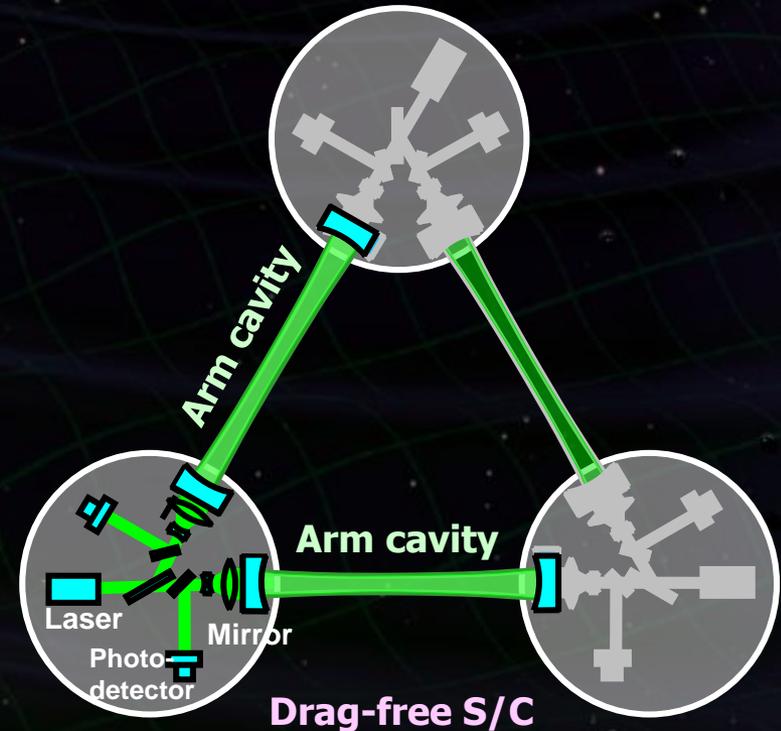
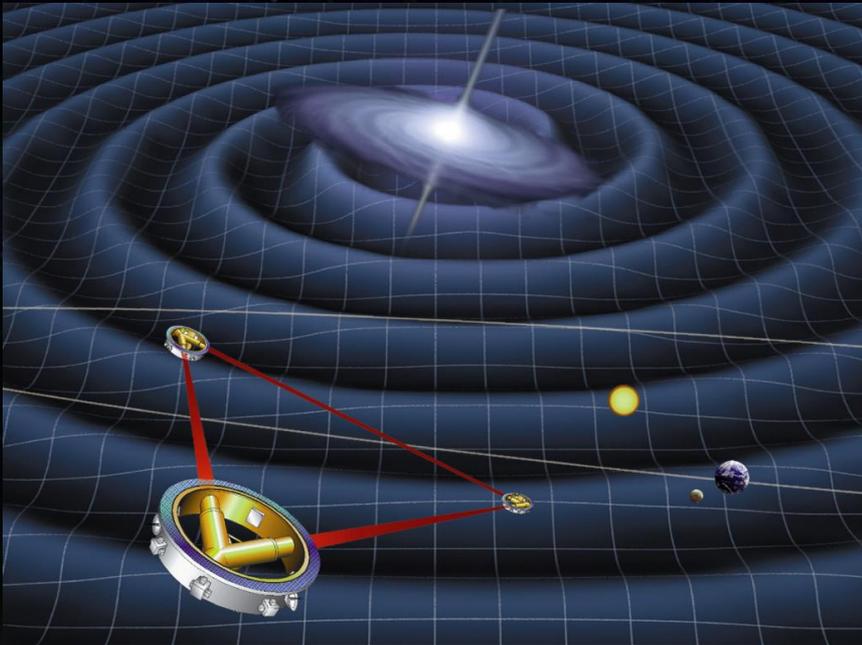
~Million km baseline length

DECIGO

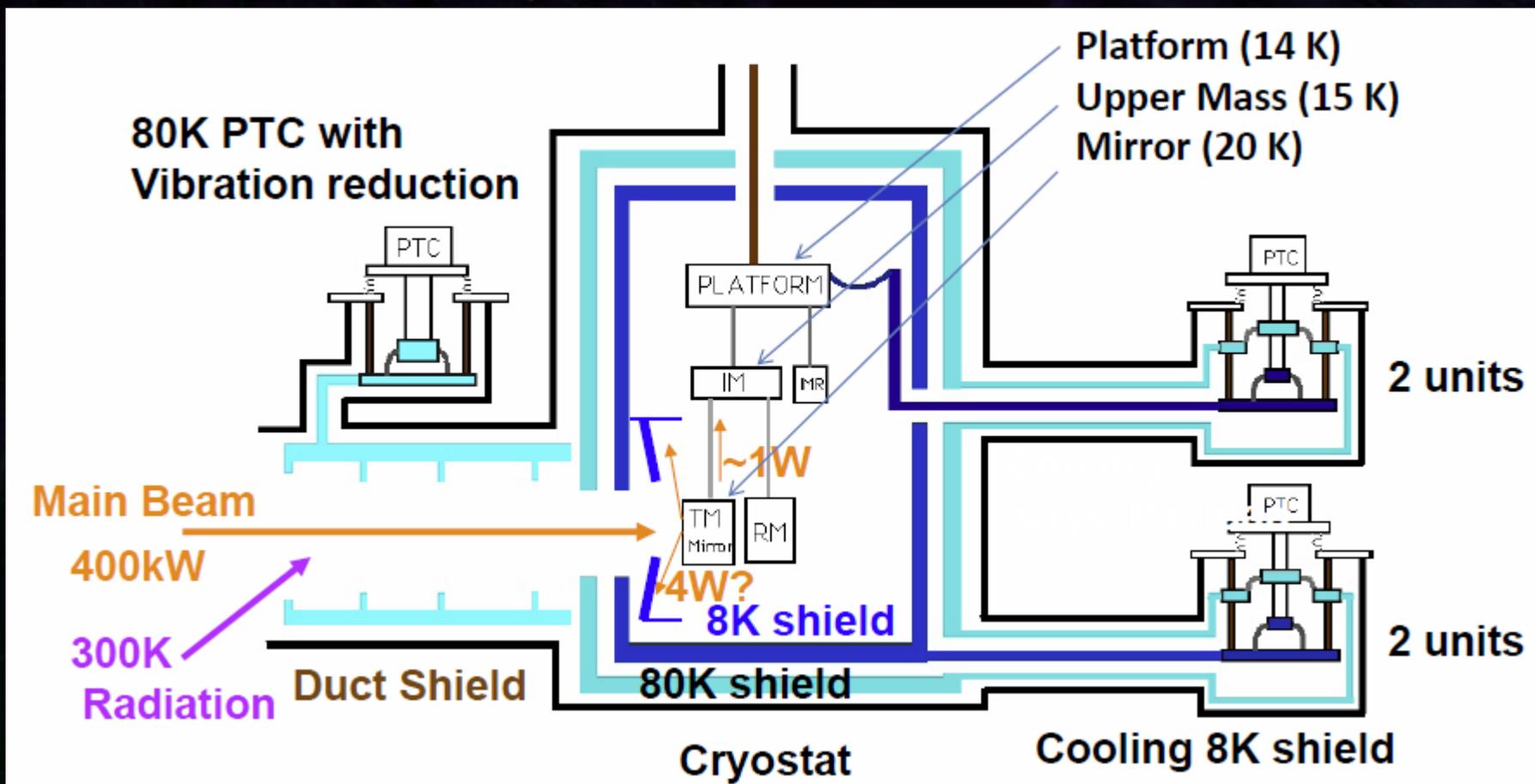
(Deci-hertz Interferometer
Gravitational Wave Observatory)

Obs. Band around 0.1Hz

1000km baseline length



鏡冷却システム

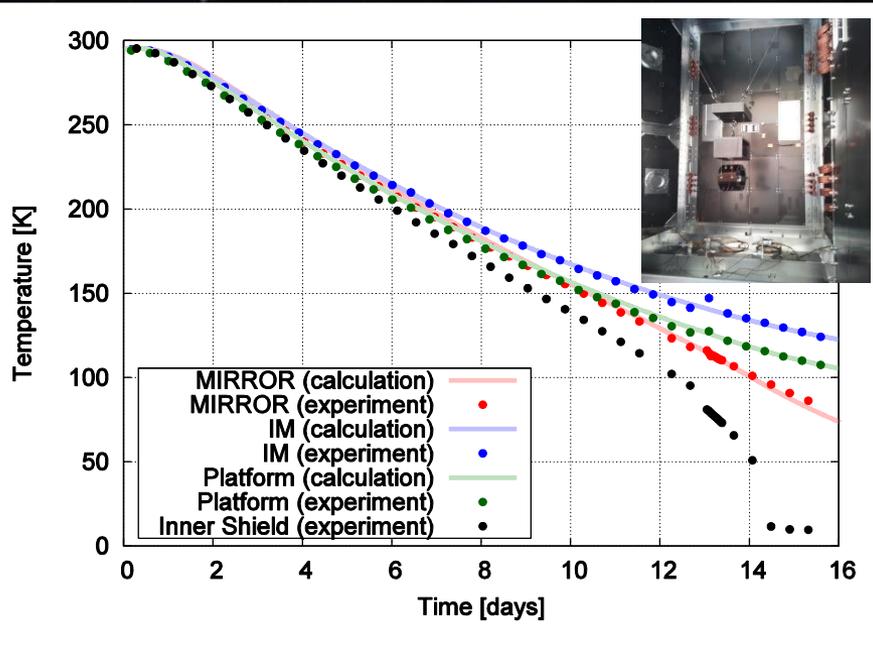


クライオスタート冷却試験

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)

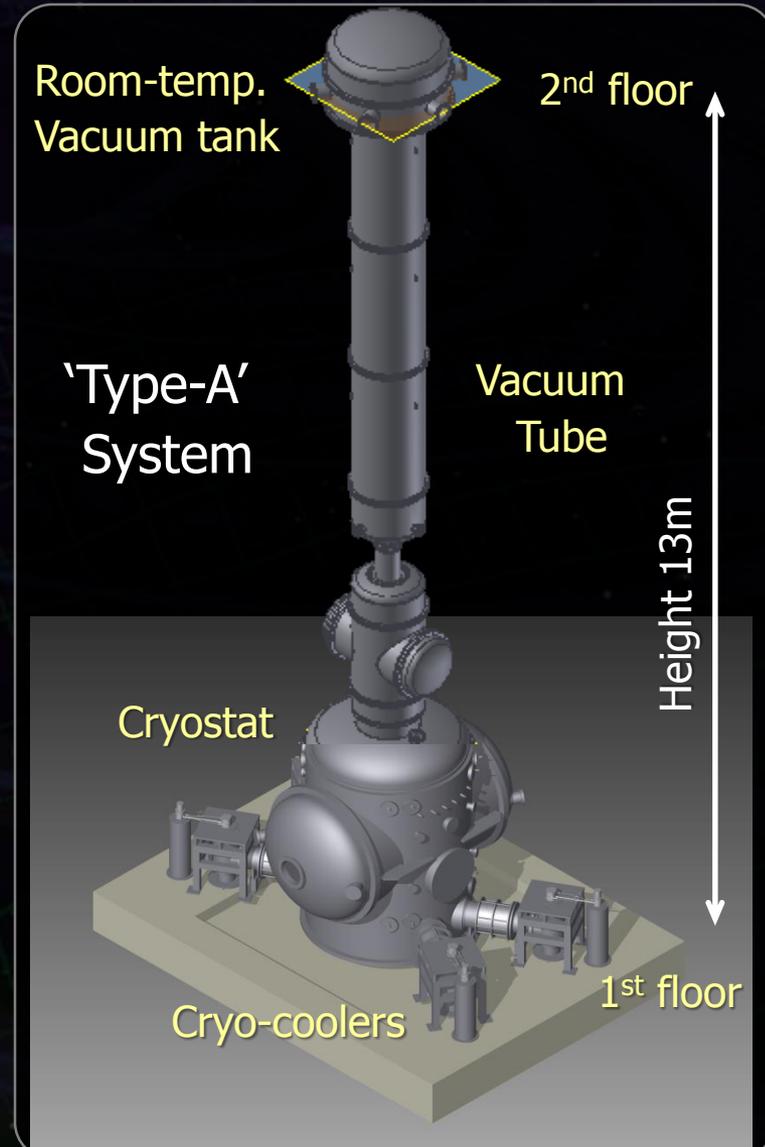
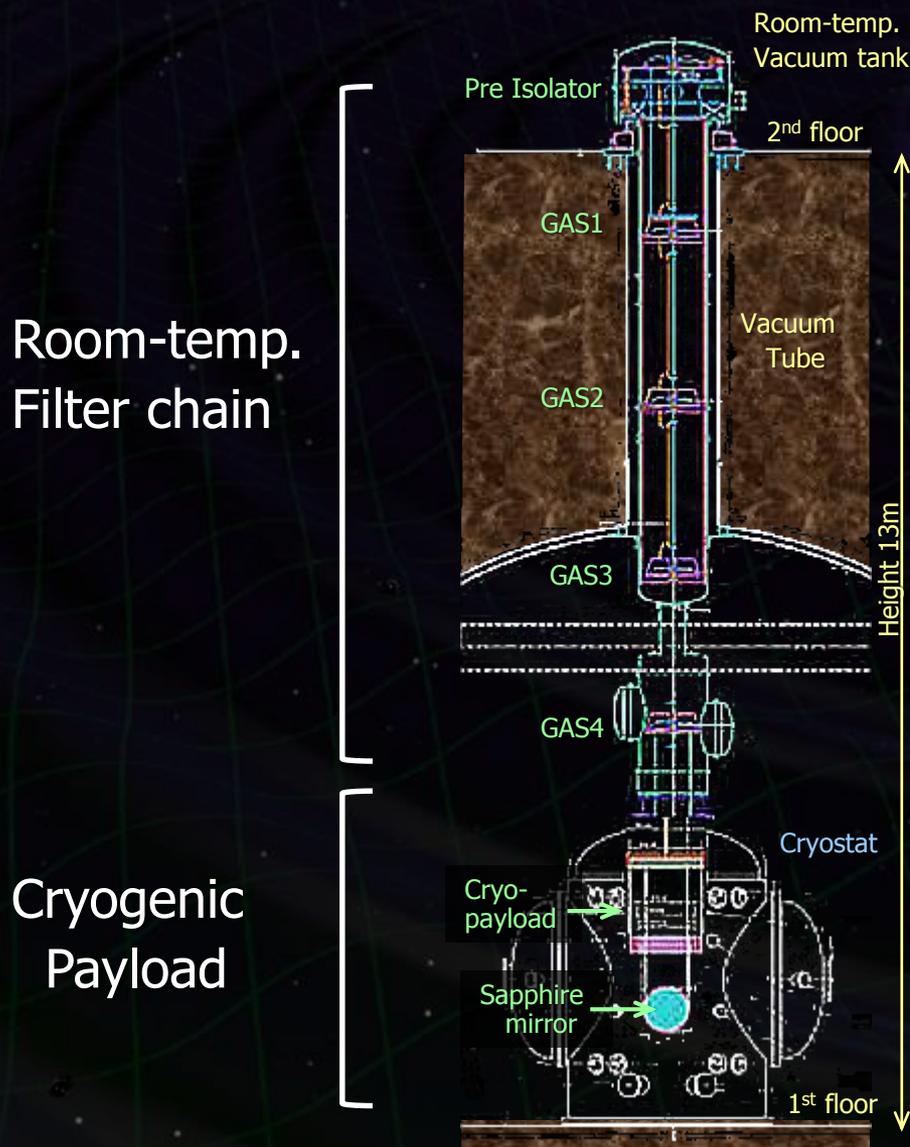
Photo by C.Tokoku

重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

低温鏡 懸架・防振装置



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

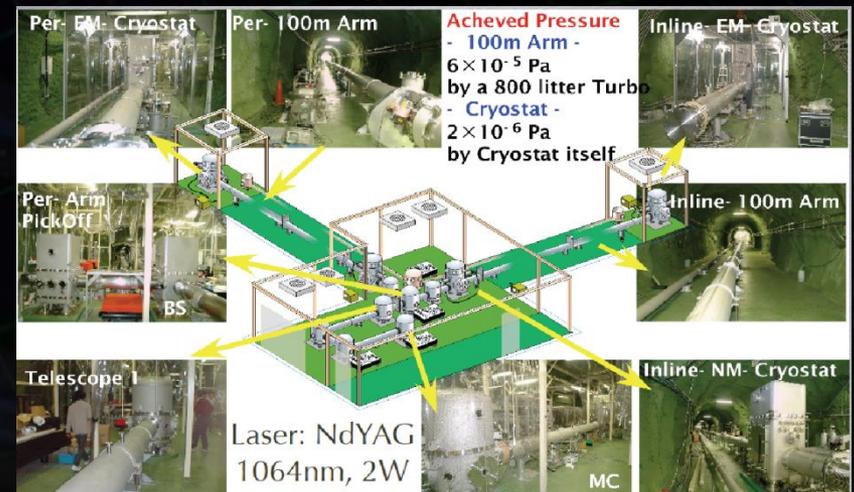
低温・地下レーザー干渉計

地下環境を生かした安定な動作

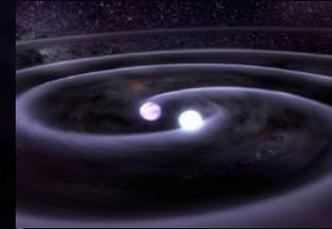
20K以下の低温での動作

→ 冷却による感度向上を確認

Uchiyama+, PRL 108, 141101 (2012)



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)

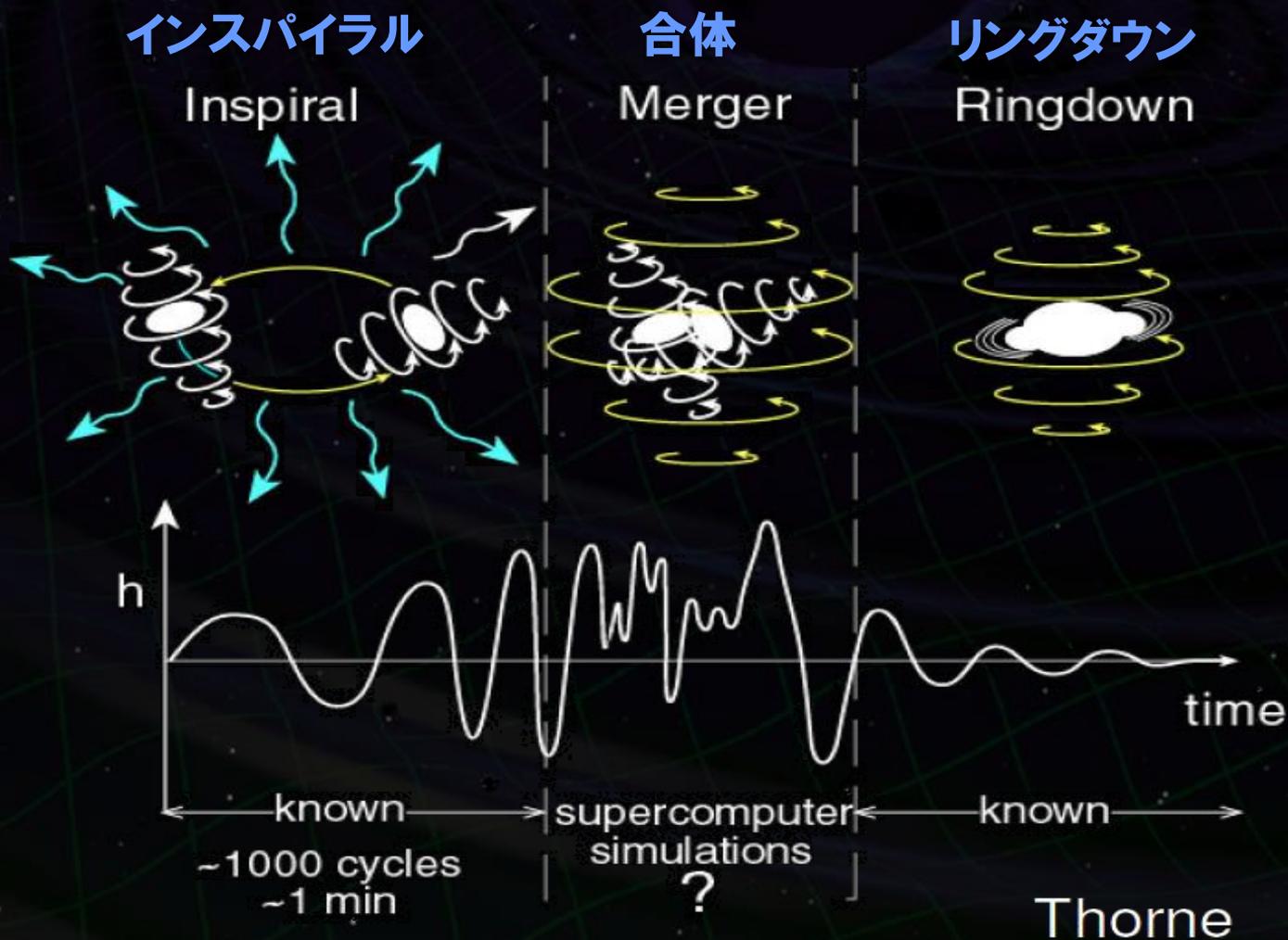


KAGRAの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

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



KAGRA : 建設進行中

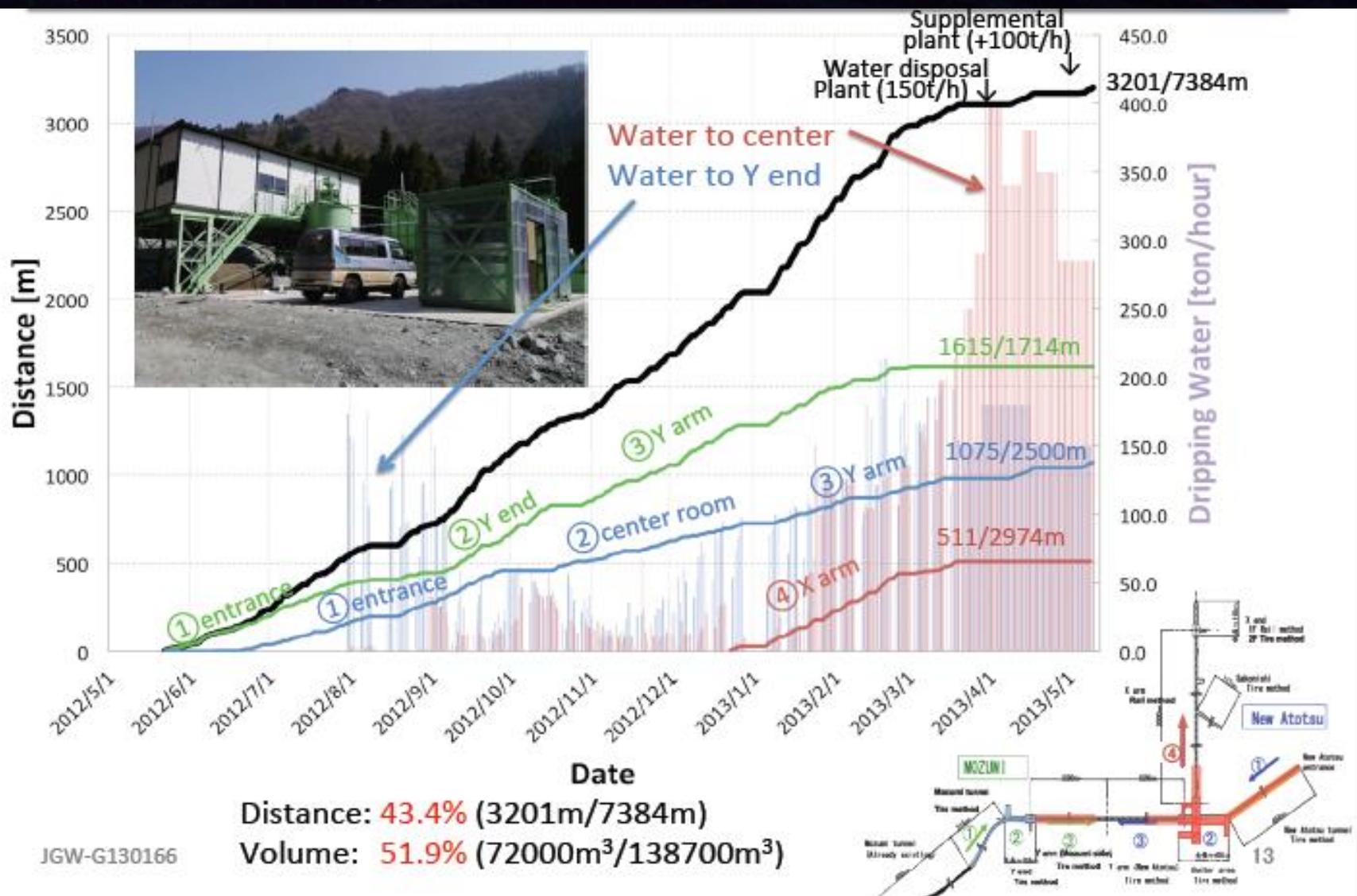
- 観測可能距離 $\sim 200\text{Mpc}$ \rightarrow 年間数回以上の重力波検出.
- 海外の望遠鏡とともに 第2世代の観測ネットワークを形成

⇨ 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!

空洞掘削状況



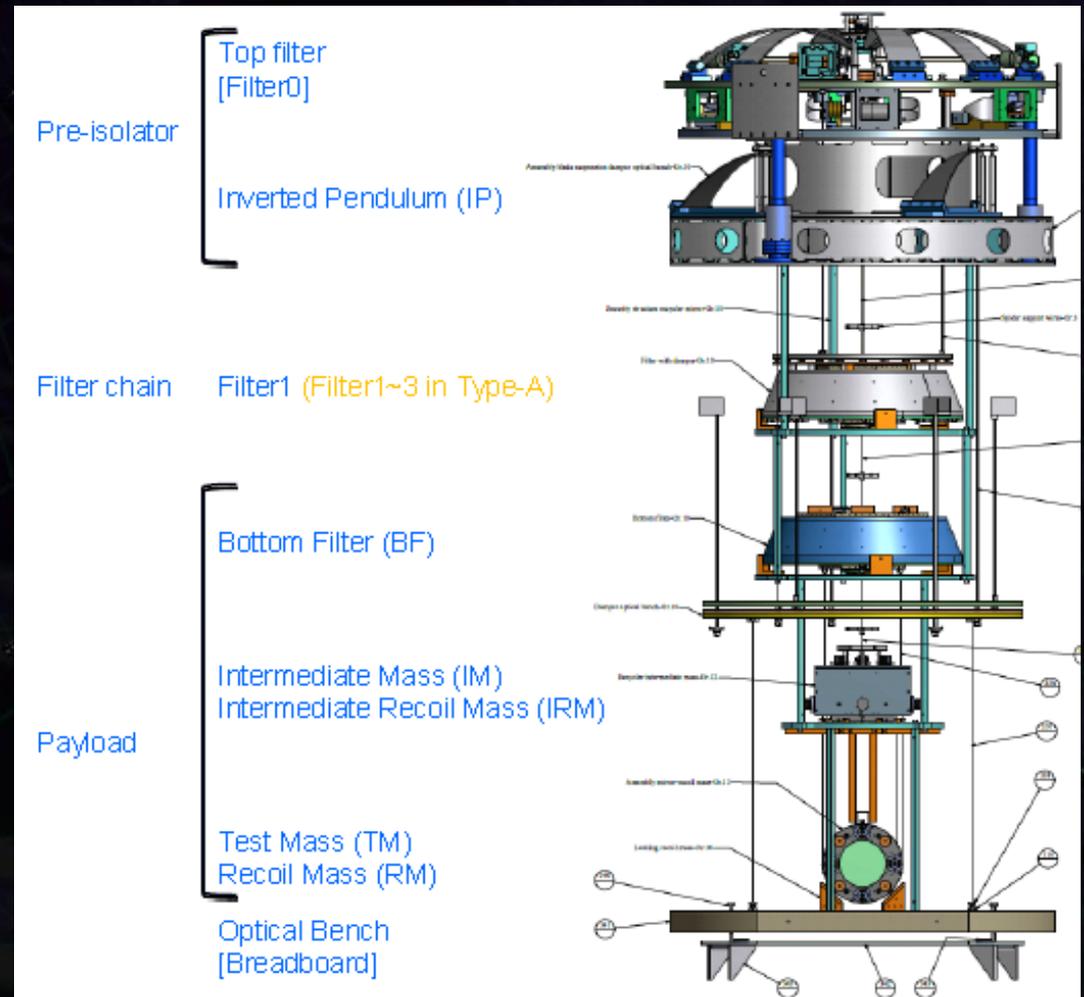
O.Miyakawa , GWADW at Elba (May 2013)

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)

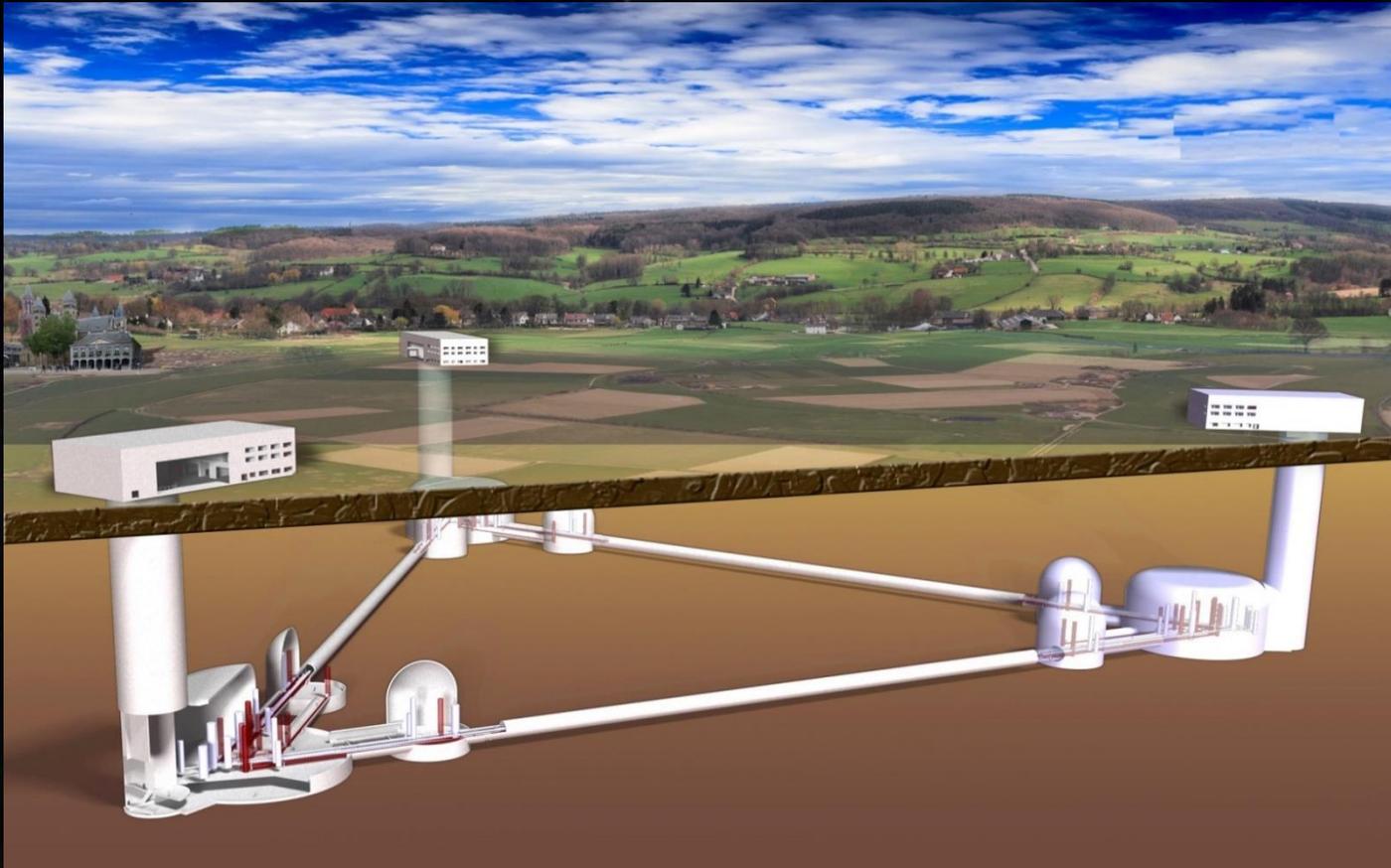


第3世代 重力波望遠鏡

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

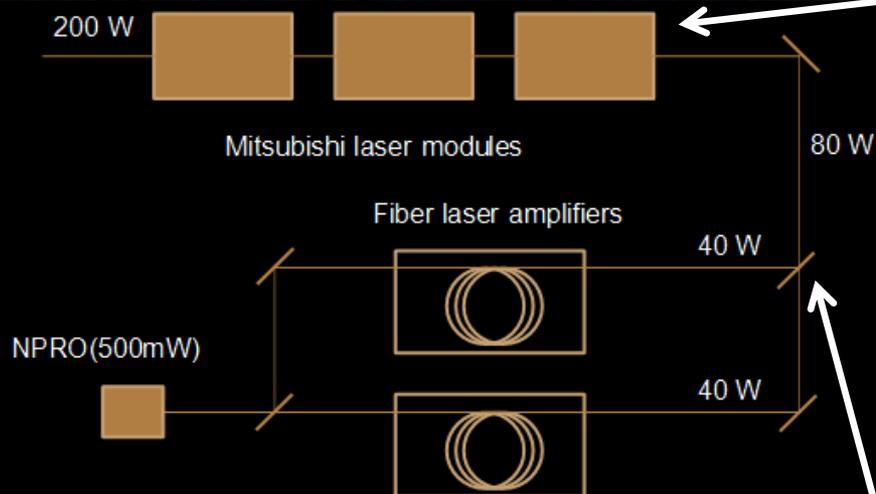


KAGRA模擬トンネル・ビームライン設置試験場

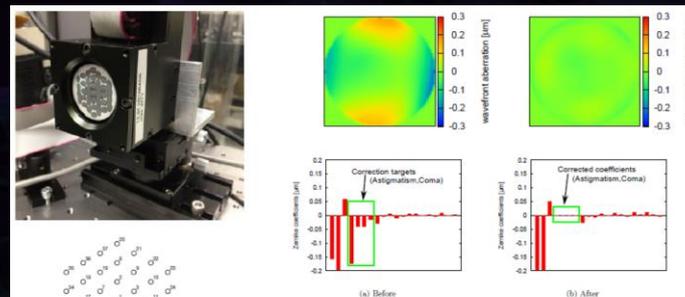


June 28, 2012, Photo by Kamiizumi and Iwasaki (ICRR)

高出力レーザー光源



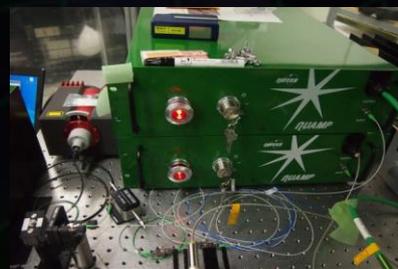
Wave-front correction (for solid-state laser amplifier)



Deformable mirror:
37 actuators

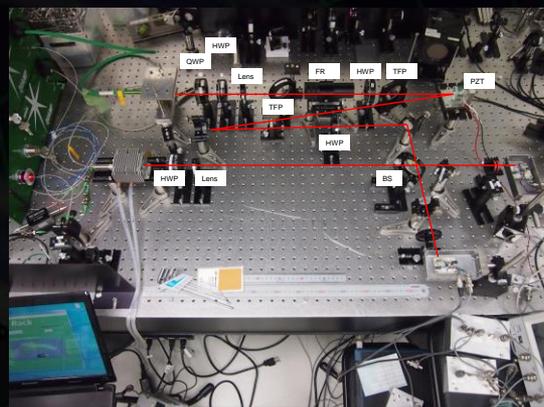
	Before pumping	After pumping	After correction
Strehl ratio	0.997	0.75-0.82	0.994

High-power Fiber amplifier



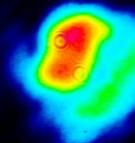
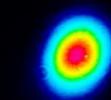
~40W / unit

Coherent Addition



Bright port 78W

Dark port 4W



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

From presentation by N.Mio

機械的振動 → 調和振動子

運動方程式 (ランジュバン方程式)

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = f_n$$

機械損失

熱揺動力

(揺動散逸定理)

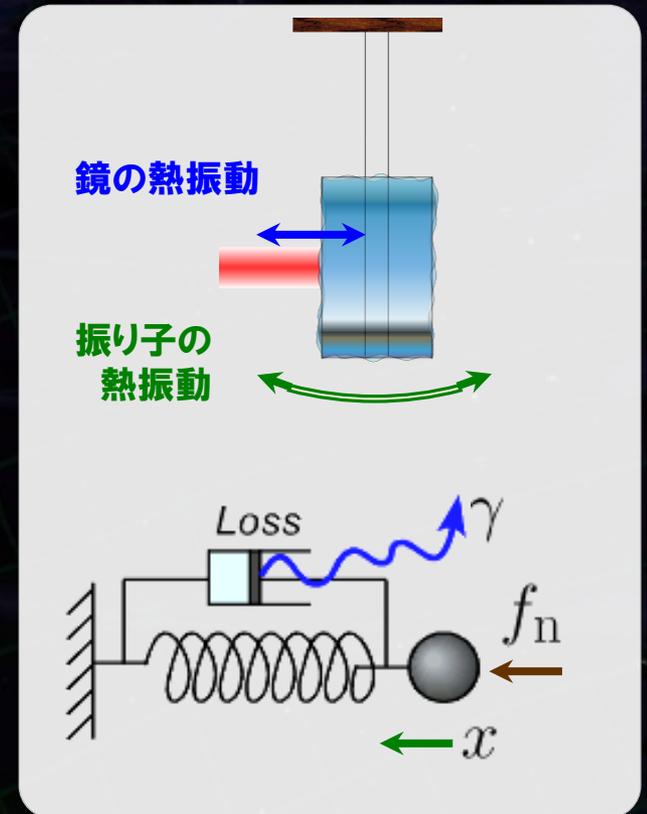
$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B\gamma T \quad (\text{白色雑音})$$

共振の鋭さ : Q値

$$Q = \frac{m\omega_0}{\gamma}$$

変動のスペクトル

$$\sqrt{\langle f_n^2 \rangle} \propto \sqrt{T/Q}$$



地面振動 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

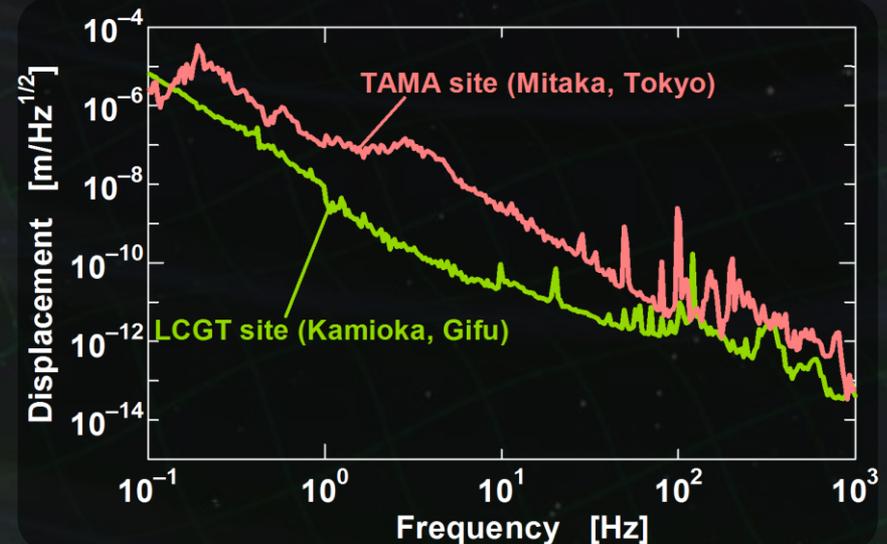
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

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,)

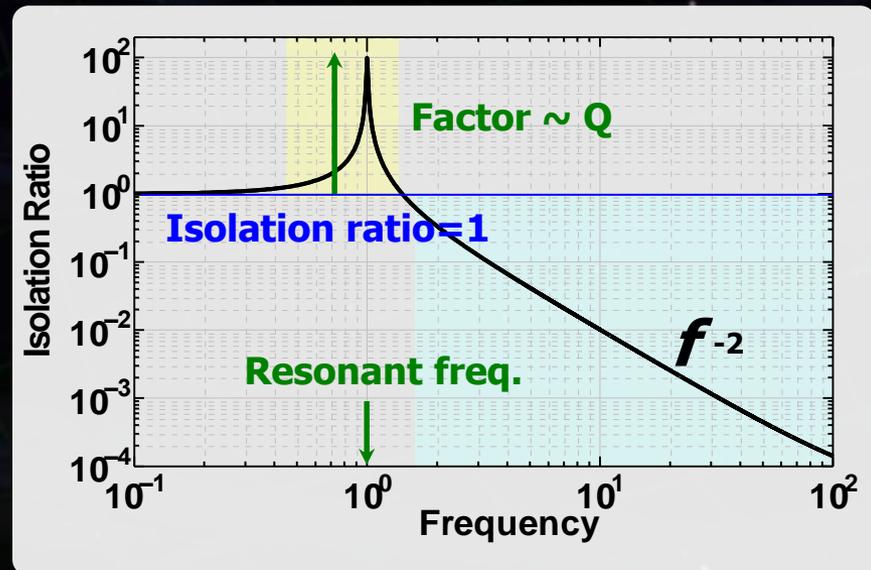
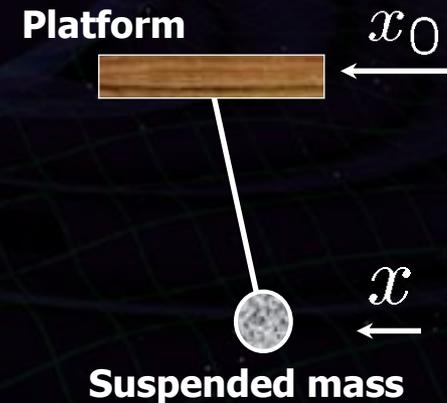


振り子を基本構成とする

1段振り子の防振比
(プラットフォームと質量の振幅比)

$$\frac{x}{x_0} = \frac{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0}}{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

- f : Frequency
- f_0 : Pendulum frequency
- Q : Q-value
(sharpness of resonance)



→ 共振周波数 f_0 より高周波数で防振

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

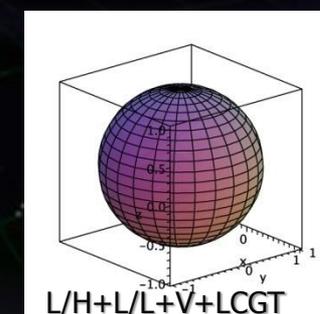
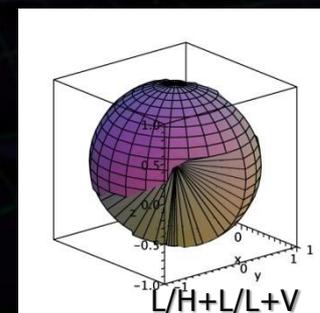
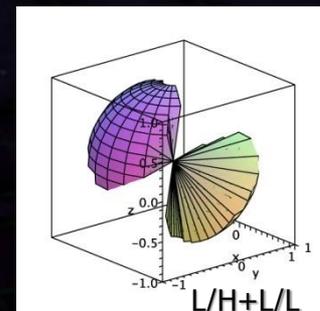
実際上の意義

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



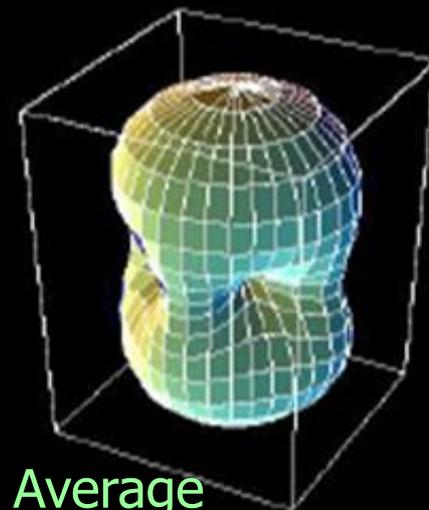
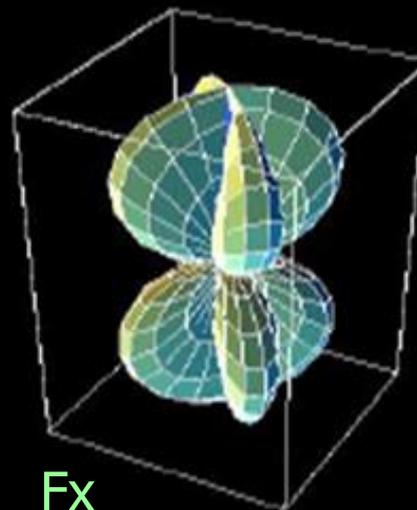
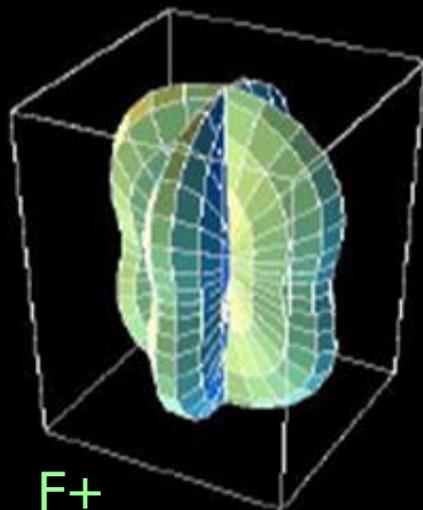
- ・干渉計型重力波検出器：指向性・偏波依存性がある。

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

干渉計のアンテナパターン

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

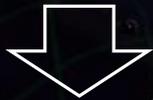
$$F_{\times} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \sin 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \cos 2\psi$$



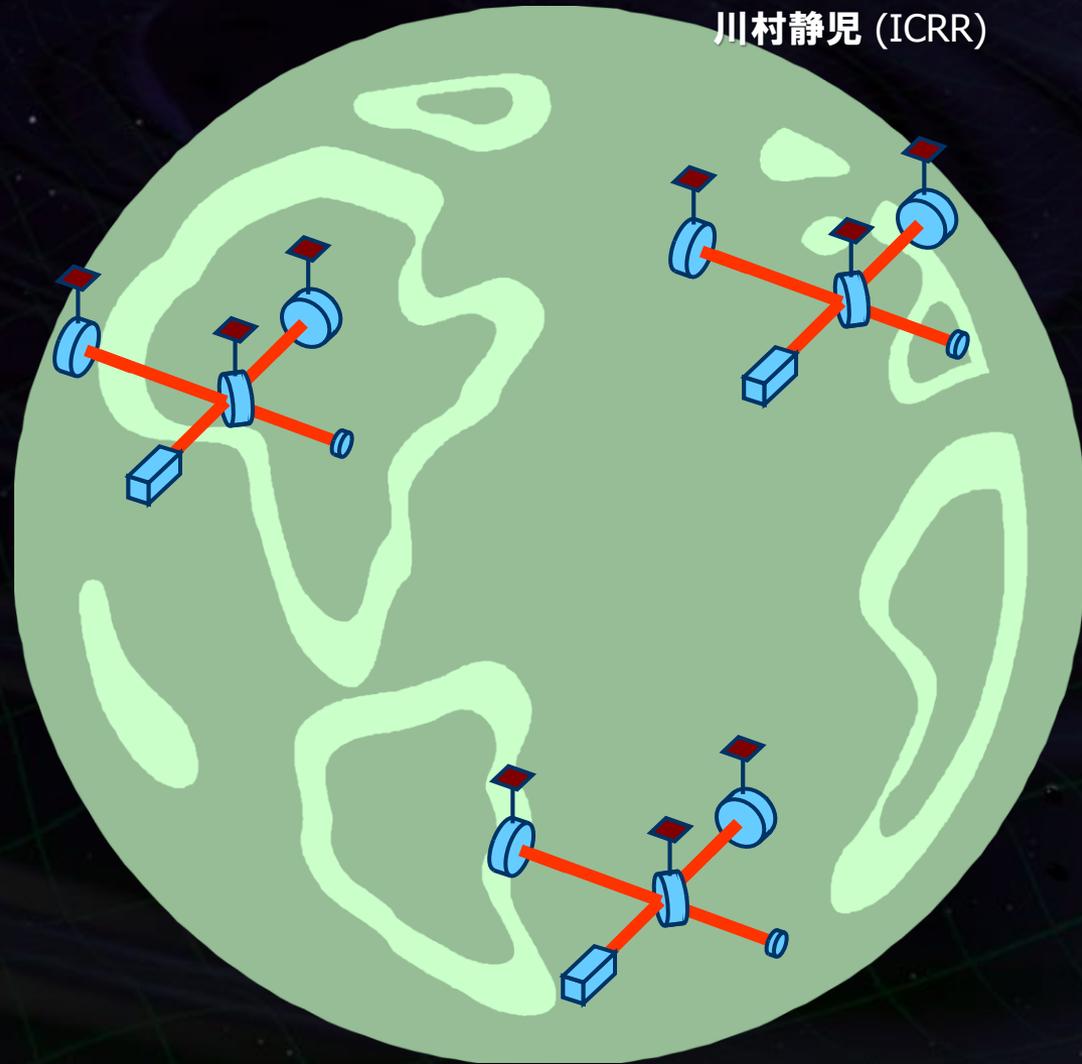
国際観測網での同時観測

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！

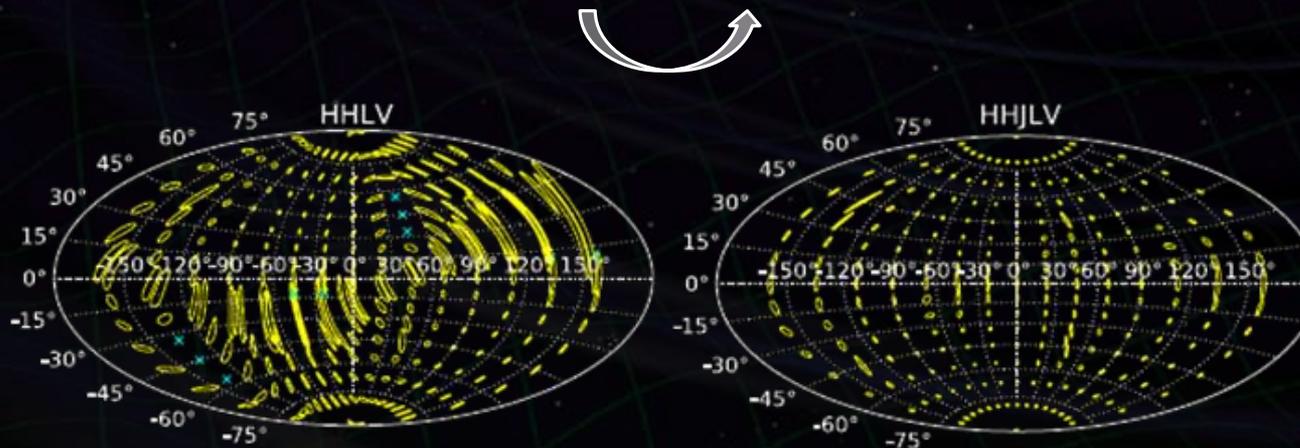


天球上の角度分解能

By H. Tagoshi

	LHV	LHVJ	LHVA	LHVJA
average of $\delta\Omega$ [Deg 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

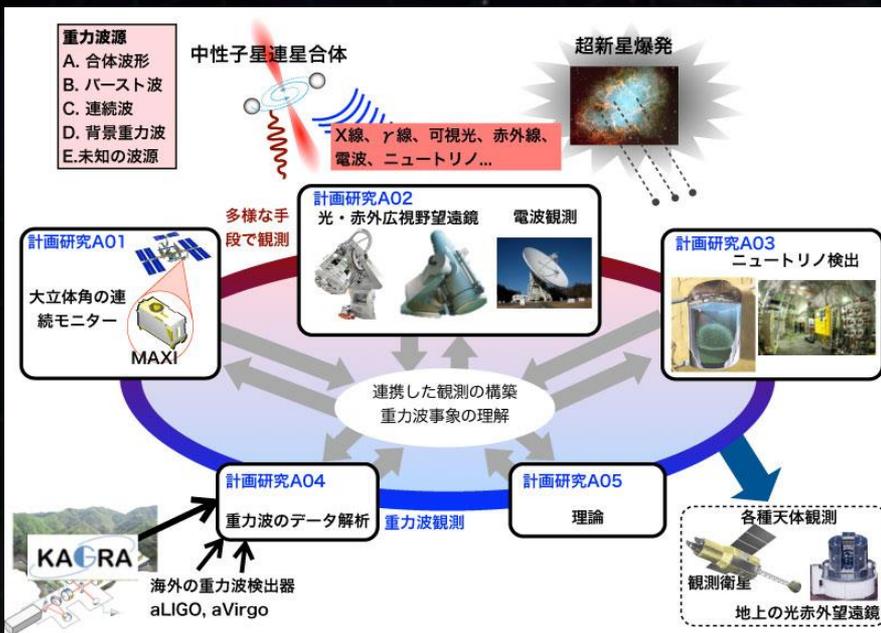


・新学術領域研究

「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.

- 重力波の初検出と重力波天文学の創生.
- 先進的な干渉計技術の実証 (第2.5世代干渉計).



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

初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

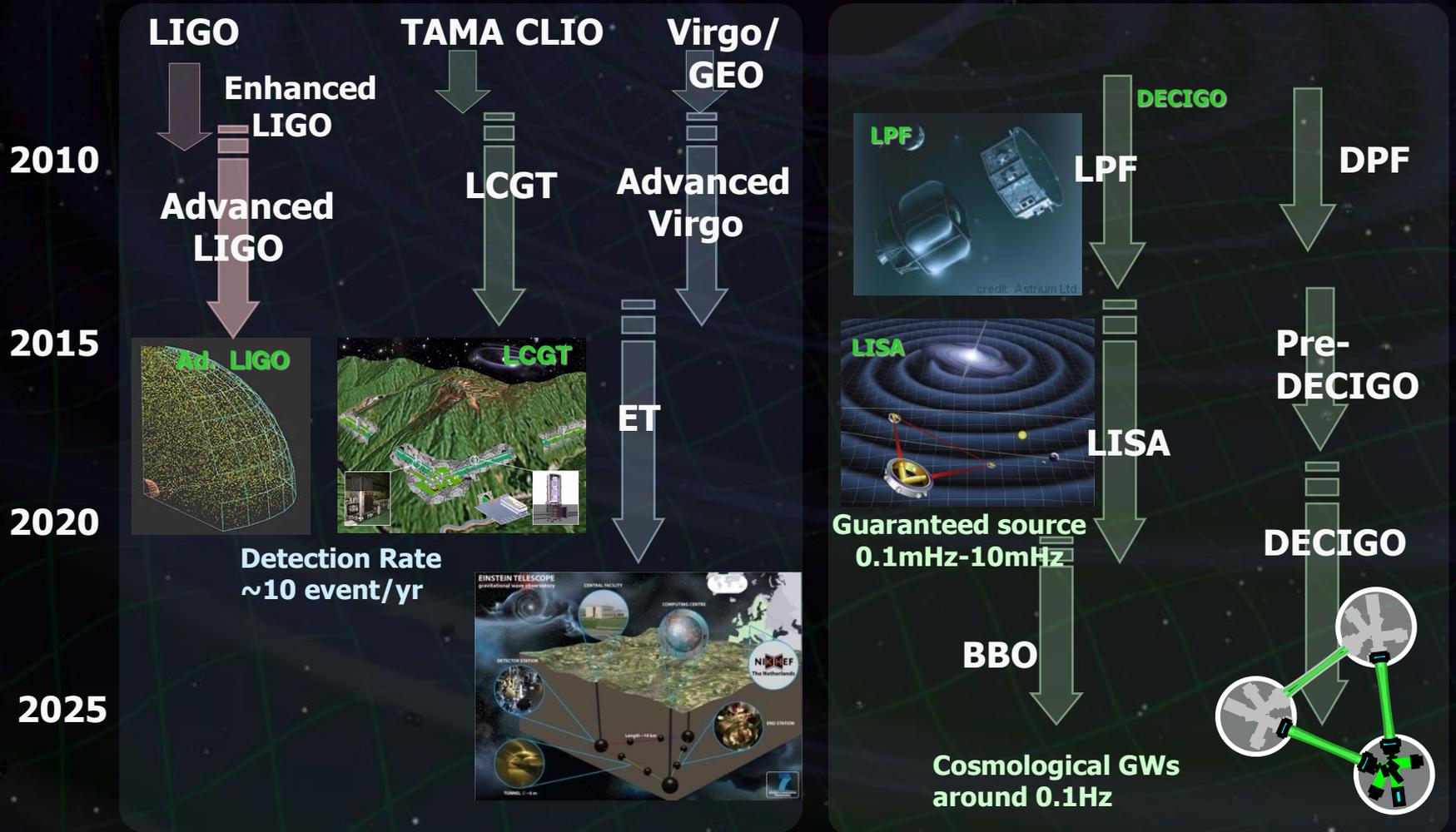
Roadmap of GW detectors

Ground based detectors

Improved sensitivities (10-1kHz)

Space-borne detectors

Low-frequency sources (0.1mHz – 1Hz)



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

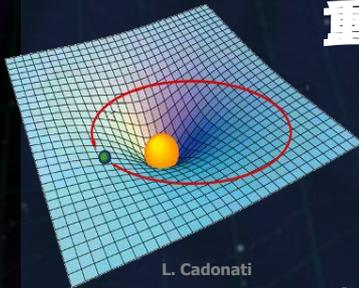
同時観測
数値相対論

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

一般相対性理論



L. Cadonati

重力：時空の性質

アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の歪み

質量
(エネルギー・運動量)

変動成分



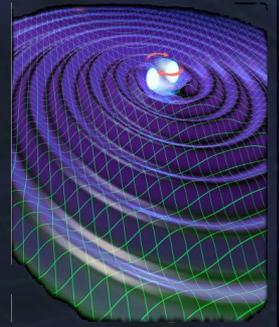
重力波

重力波天文学

宇宙を探る新しい目

激しい天体現象

誕生直後の宇宙の姿



測定成分



重力

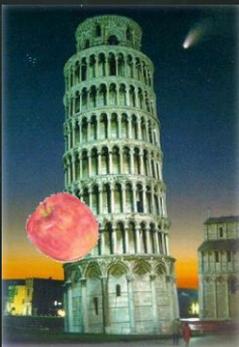
時空の成り立ちを探る

現代物理学の諸問題への知見

高次元時空, 重力子の振る舞い

基礎物理法則に対する知見

重力の逆二乗則, 等価原理



Tom Haruyama

観測



微小変動測定

マクロな系の微小変動計測

レーザー干渉計

量子光学, 観測理論

外乱の除去・抑圧, 冷却

熱雑音, 地面振動

測定



・時空を探る研究 (相対論・重力)

- ローレンツ不変性の検証実験 (道村: PRL 110, 200401).
- 重力逆二乗則の検証実験 (柴田, 牛場).

・精密計測実験 (量子オプトメカニクス, 時間標準)

- 巨視系の量子的振る舞いの実験研究 (松本).
- 光格子時計測定用の安定化レーザー光源 (麻生, 牛場).
- 非平衡系での熱雑音 (柴田).

・重力波観測の新展開

- 宇宙重力波望遠鏡 (穀山).
- ねじれ型重力波望遠鏡 (正田).

DECIGO-WG **メンバー** 145名

理論	57名
実験	80名
シニア	8名

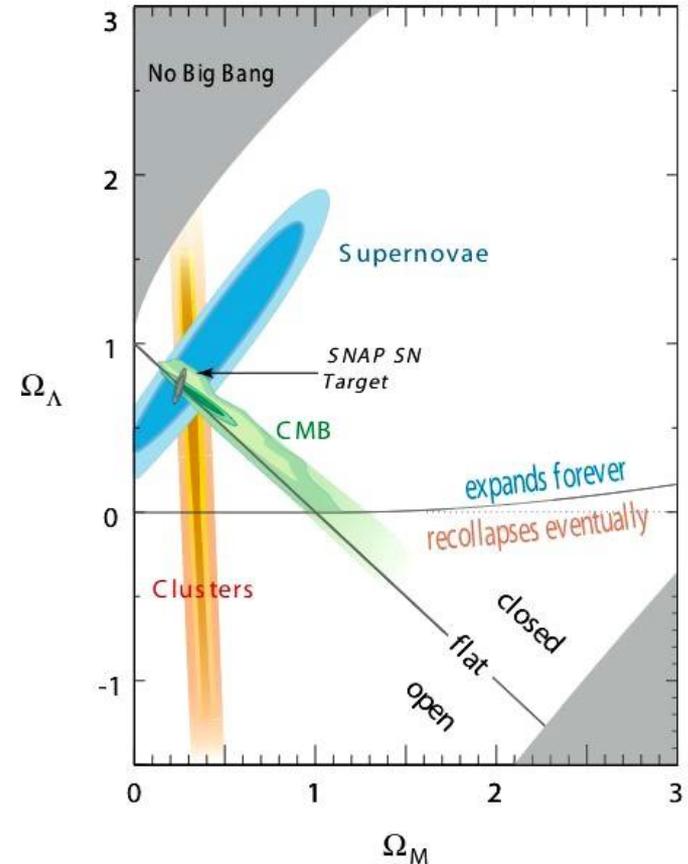
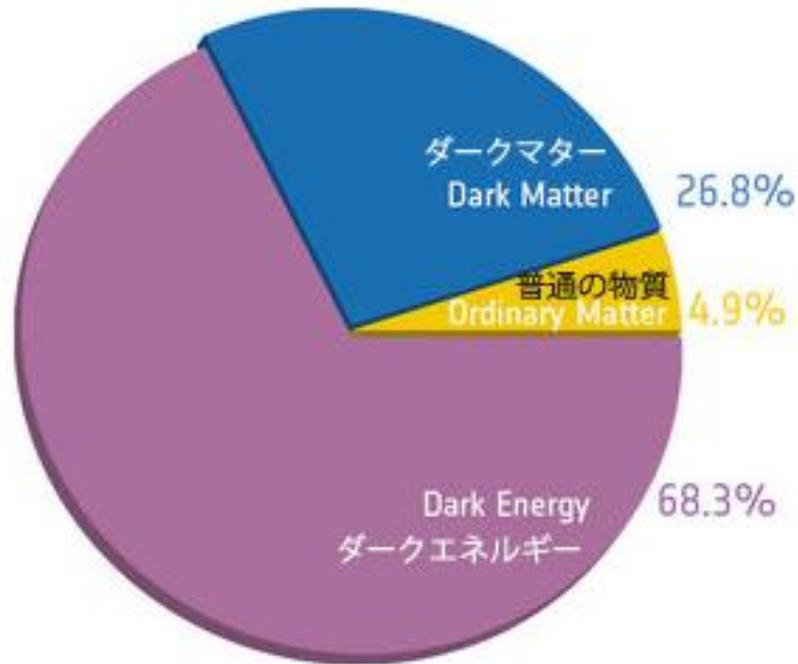
実験 80名の内訳

KAGRAでも 主要 タスクを担うメンバー	17名
KAGRAでも 一部 のタスクを持つメンバー	3名
DECIGO/DPFのみに参加	57名
国外	4名

宇宙の成り立ちを表すパラメータ.

→ 宇宙の年齢・組成・進化を決める.

プランク衛星の
観測結果 (2013)



遠方の超新星爆発の観測

→ 宇宙の加速膨張を直接証明.



2011年ノーベル物理学賞
パールムッター, シュミット, リース
「遠方超新星爆発の観測による
宇宙の加速膨張の発見」



The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess



Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



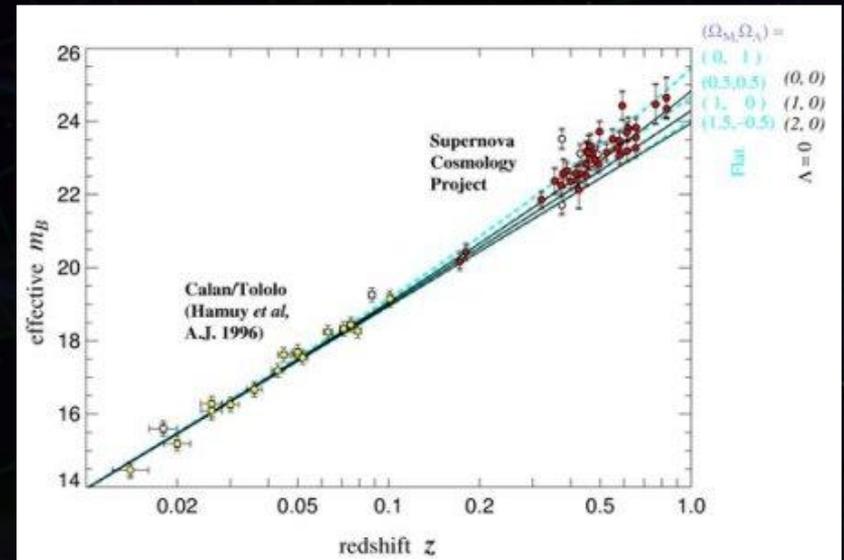
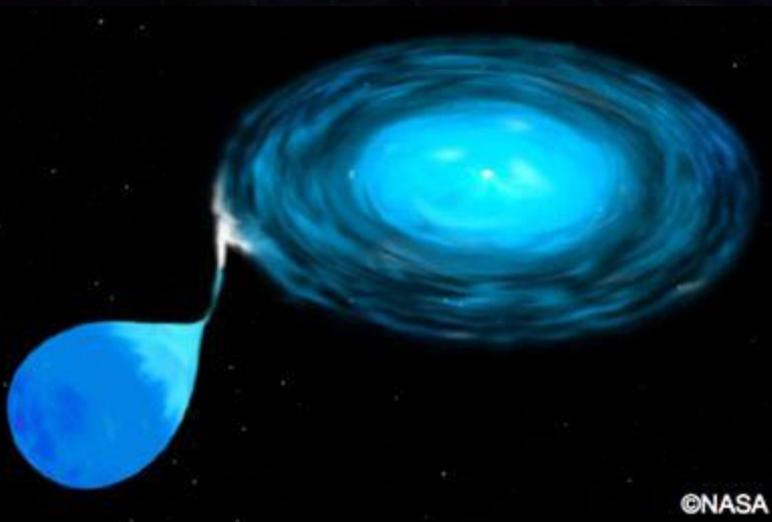
Photo: U. Montan

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

Type Ia 超新星爆発：標準光源

- 伴星からの降着物質が臨界質量を超えたときに発生.
- ほぼ同じ爆発エネルギーを持つ. → 距離が分かる.
- 分光観測 → 赤方偏移量が分かる.



連星中性子星：標準音源

- 宇宙論的距離にある連星中性子星 $\sim 10^5$ 個.
- 波形から、連星を構成する中性子星の質量が分かる.
- 振幅は質量のみで決まる. \rightarrow 距離が分かる.
- 母銀河を特定 \rightarrow 赤方偏移量.

連星系からの重力波

$$M_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

観測データより $h_{+,\times}, f, \dot{f}$ が分かる

$$\dot{f}(t) \propto [(1+z)M_c]^{5/3} f^{11/3}, \quad M_z \equiv (1+z)M_c \text{ が分かる}$$

$$h_{+,\times}(t) \propto \frac{[(1+z)M_c]^{5/3} f^{2/3}}{D_L}, \quad D_L: \text{光度距離が決まる}$$

赤方偏移は不定 (遠くの軽い連星? or 近くの重い連星?)

- \rightarrow 電磁波の観測からホスト銀河 (赤方偏移) が分かれば、 M_c も決まる
- \rightarrow 重力波によるハッブル図 (z, d_L) が書け、宇宙膨張測定が可能 (距離梯子は必要無い。標準光源としての SNe の検証。)

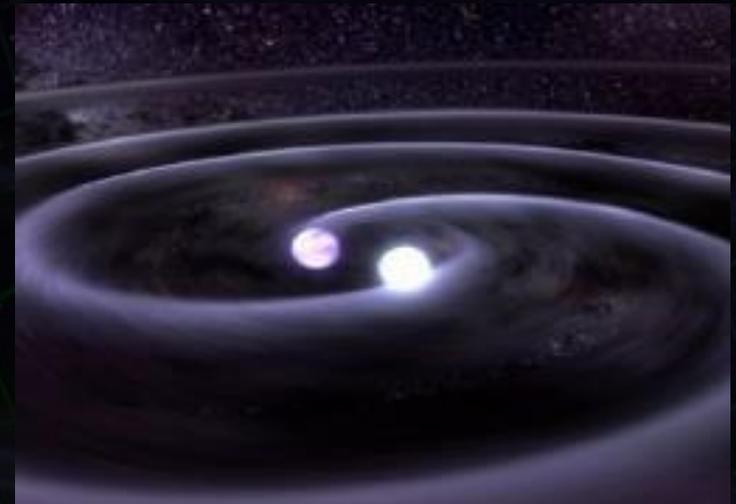


Fig by Nishizawa (2011)

宇宙論パラメータ決定精度

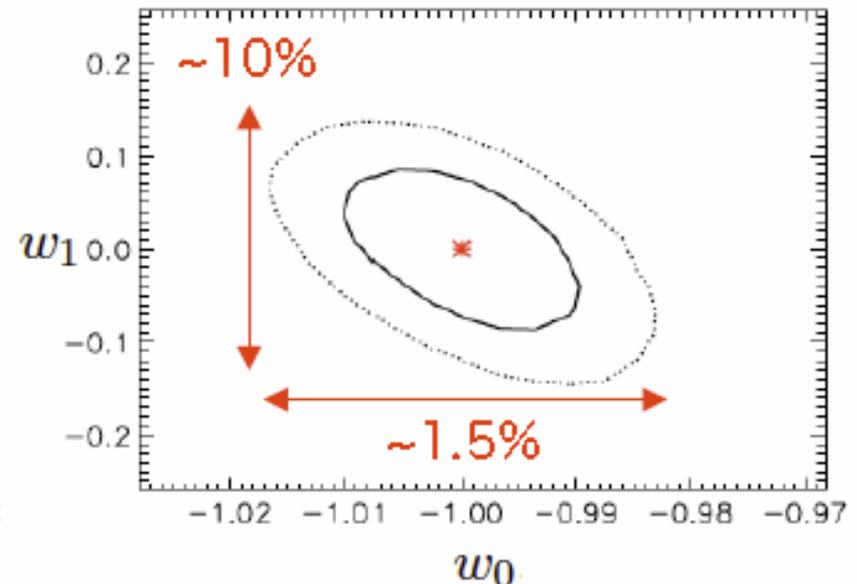
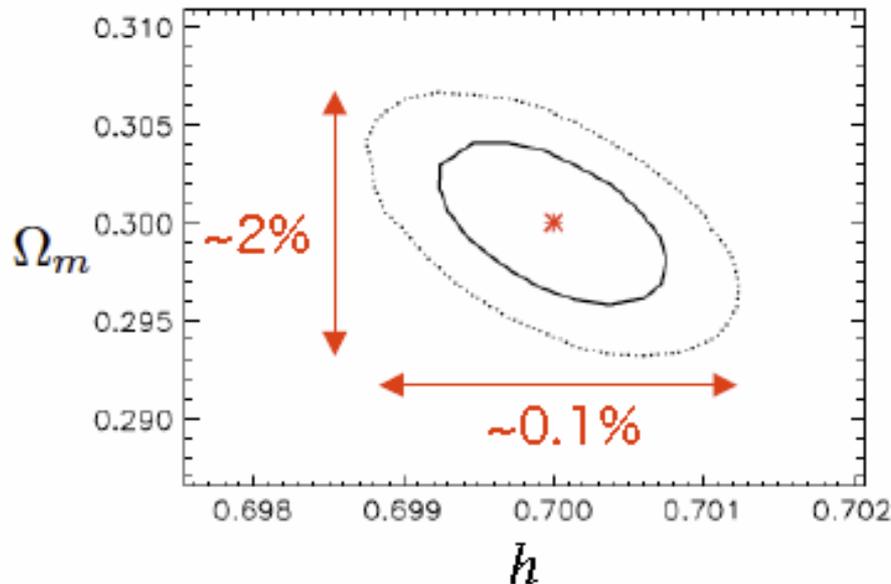
Fig by Nishizawa (2011)

BBOで観測される $\sim 10^5$ 個の連星を用いて、宇宙論パラメータを決定する

平坦宇宙、観測時間 3yr を仮定

[Cutler & Holz 2009]

$$w(z) = w_0 + w_1 \frac{z}{1+z}$$



la 型超新星に比べて、非常に良い決定精度 !!

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

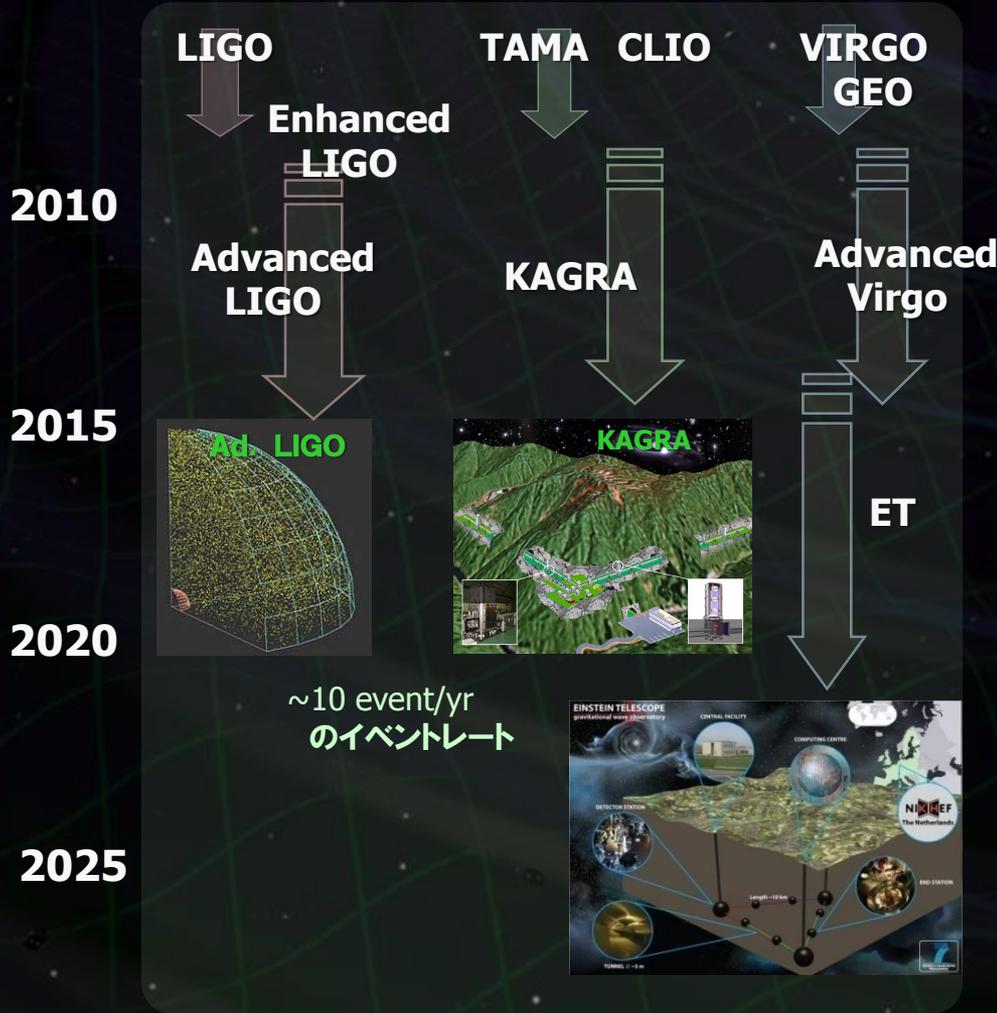
(*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

(*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。

重力波天文学のロードマップ

地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測 (1Hz以下)



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)

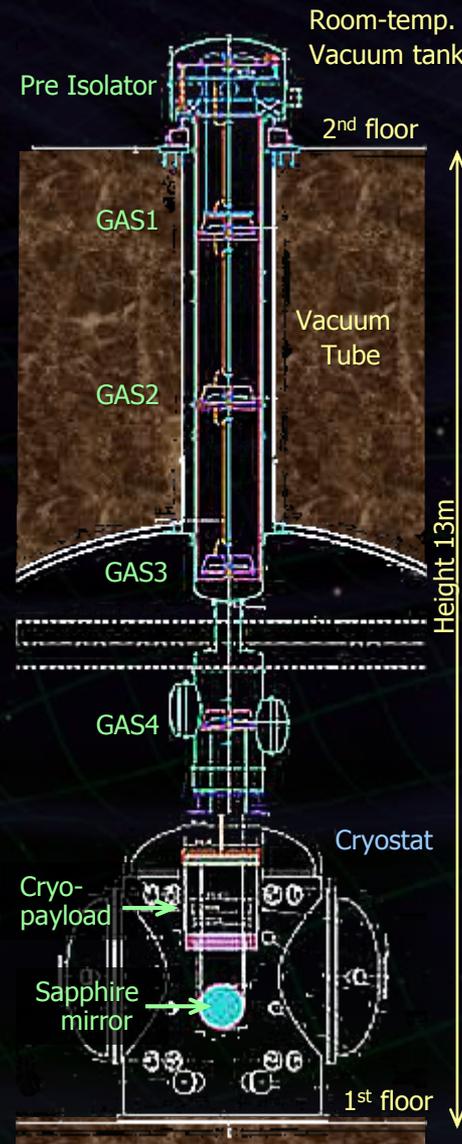
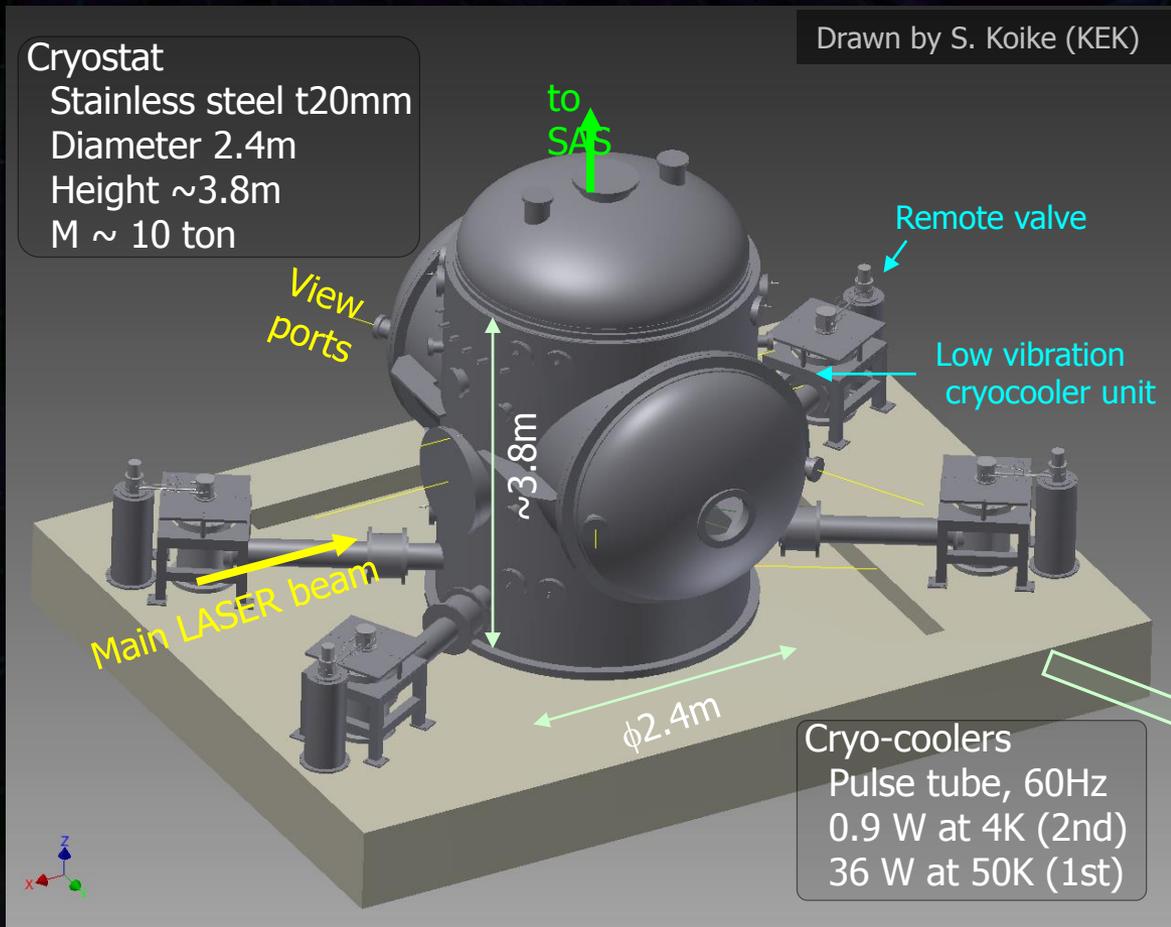


Gifu Pre.
Hida-city
Kamioka
Ikenoyama mt.



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.



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.



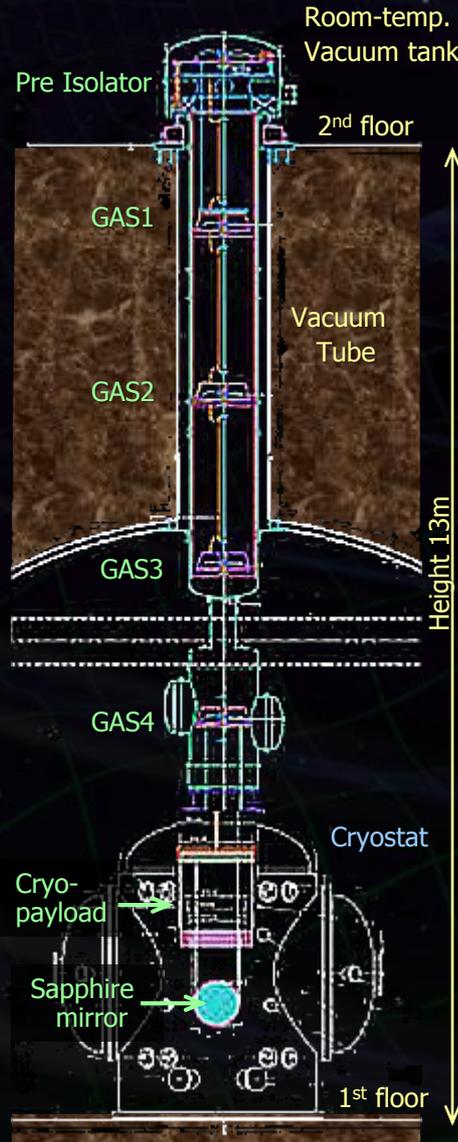
Pre Isolator



GAS filter

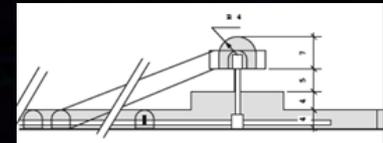
低温ペイロード

- 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

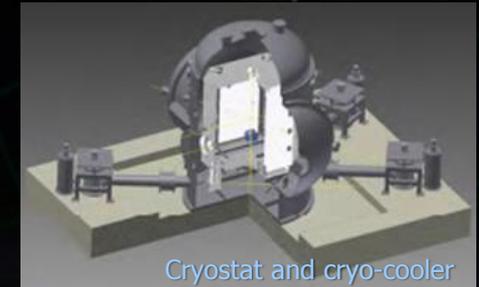


クライオスタット・冷却系

- 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)



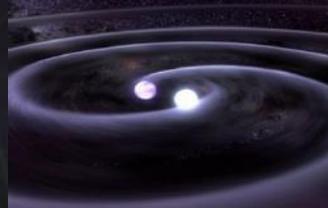
宇宙重力波望遠鏡のターゲット

宇宙重力波望遠鏡 -- 0.1mHz – 1 Hz の観測周波数帯

⇒ 中間/巨大ブラックホール, 初期宇宙

中性子星・白色矮星

連星



パルサー



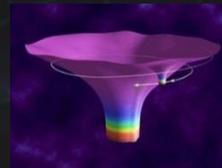
定常的・準静的な自転・公転運動

ブラックホール



巨大ブラックホールの合体

EMRI

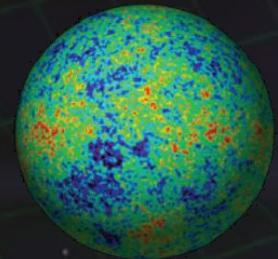


準固有振動

初期宇宙

多数天体の重ね合わせ

背景重力波



電磁波
ニュートリノ

同時観測
数値相対論

重力理論の検証

超巨大BHの形成過程
銀河形成史

宇宙論, 宇宙の誕生と発展
ダークエネルギー・ダークマター

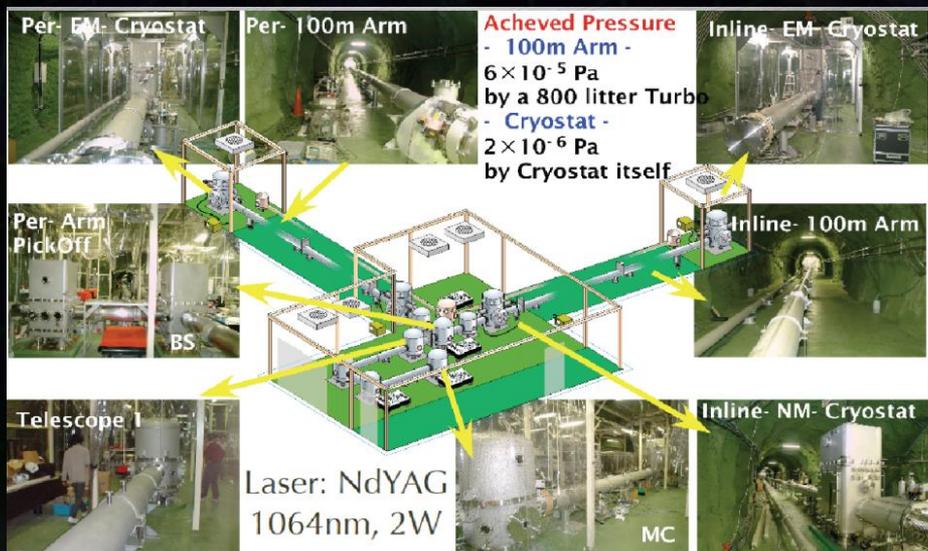
低温干渉計の動作実証

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

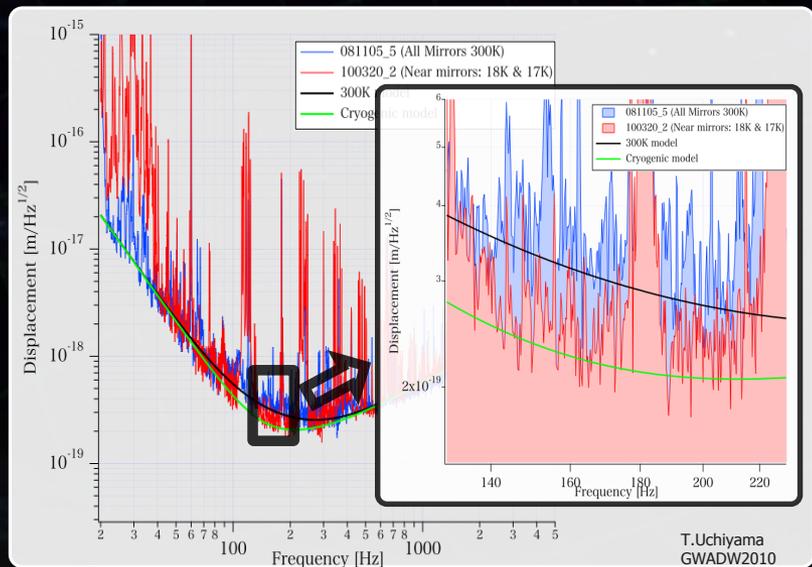
低温工学・超電導学会誌
 「低温工学」7月号でLCGT特集

⇨ 冷却運転時に感度の向上を確認。
 低温干渉計の動作実証を達成。

詳細は宮川氏講演にて。

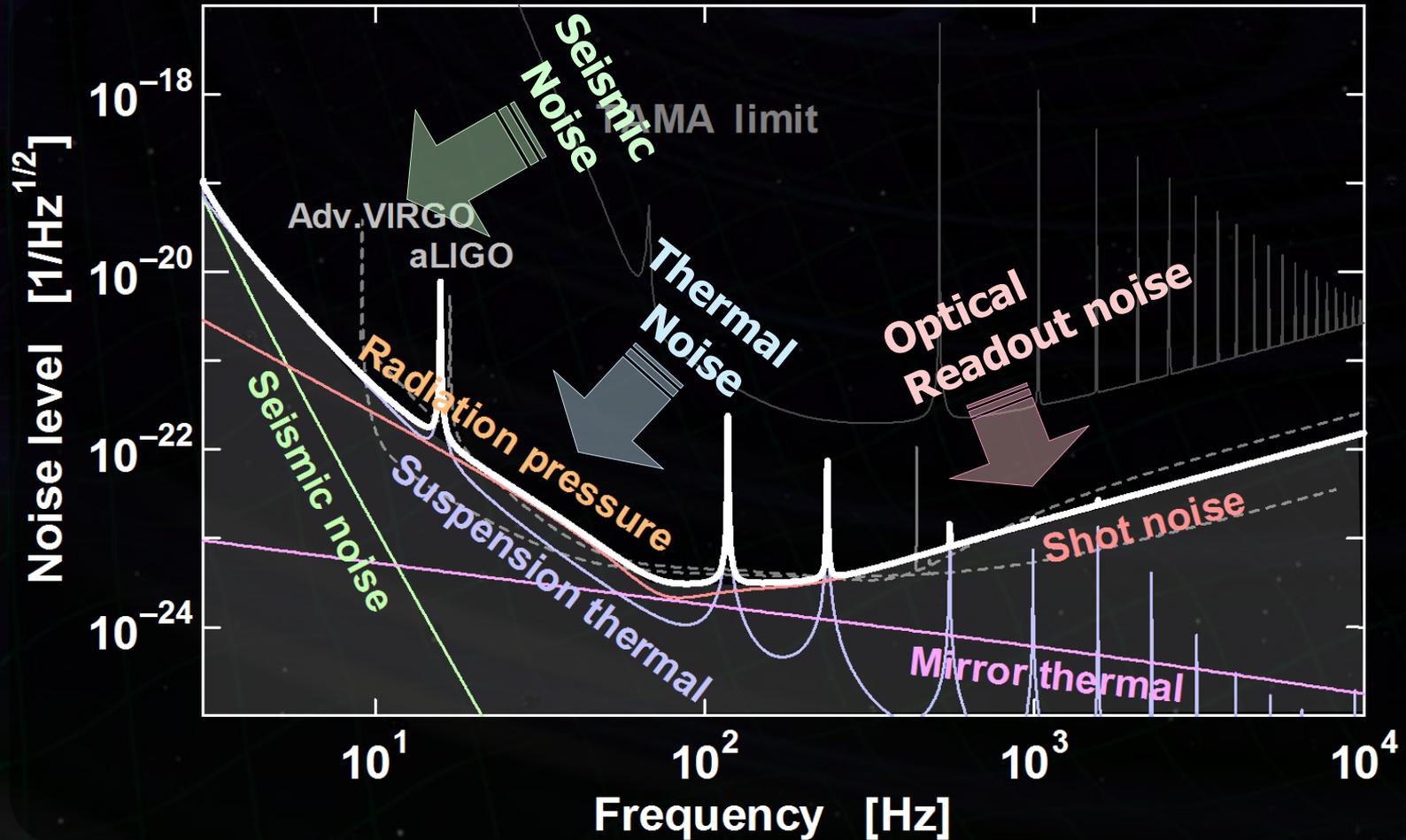


CLIO : 100-m cryogenic interferometer

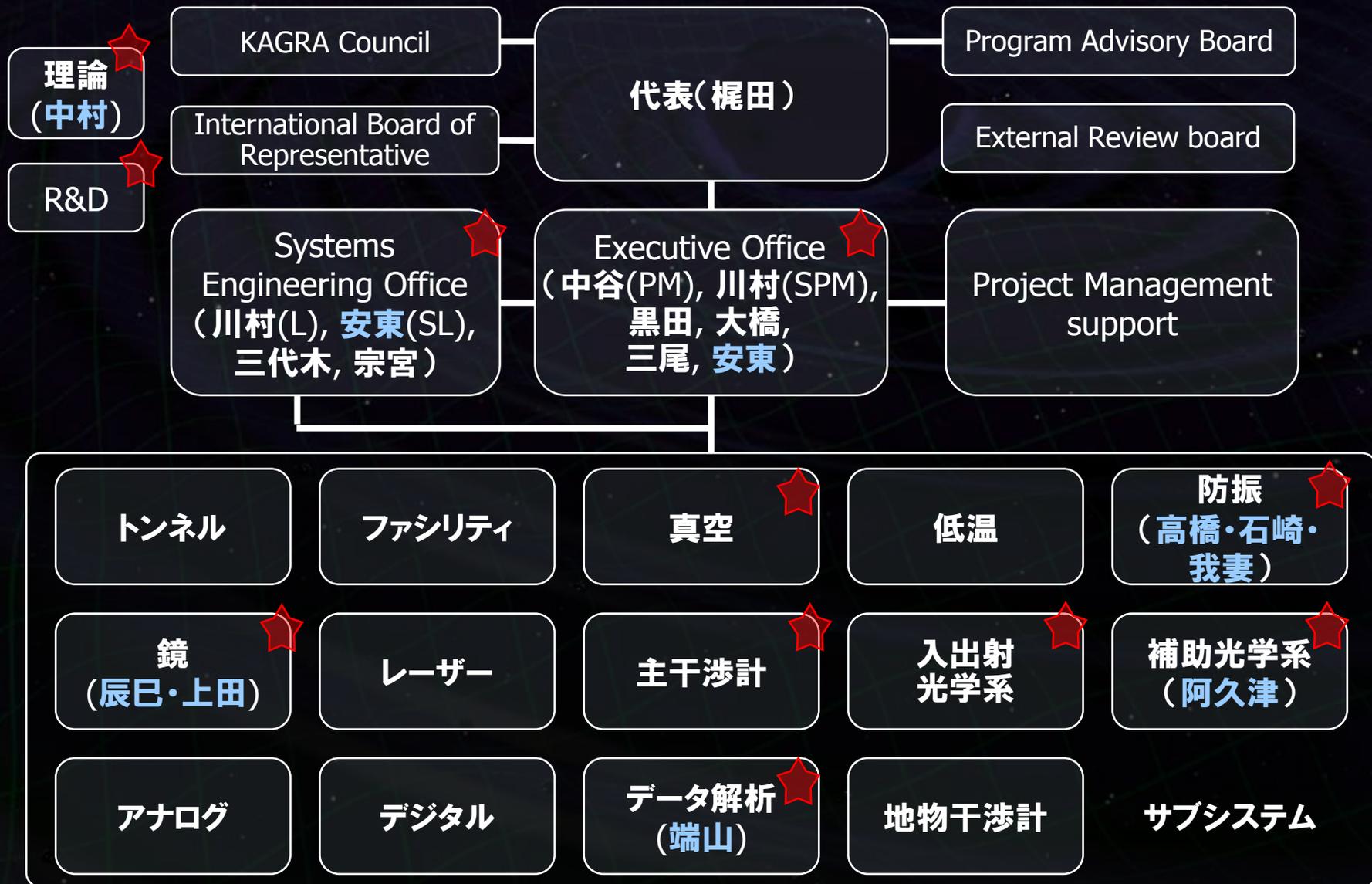


感度の向上

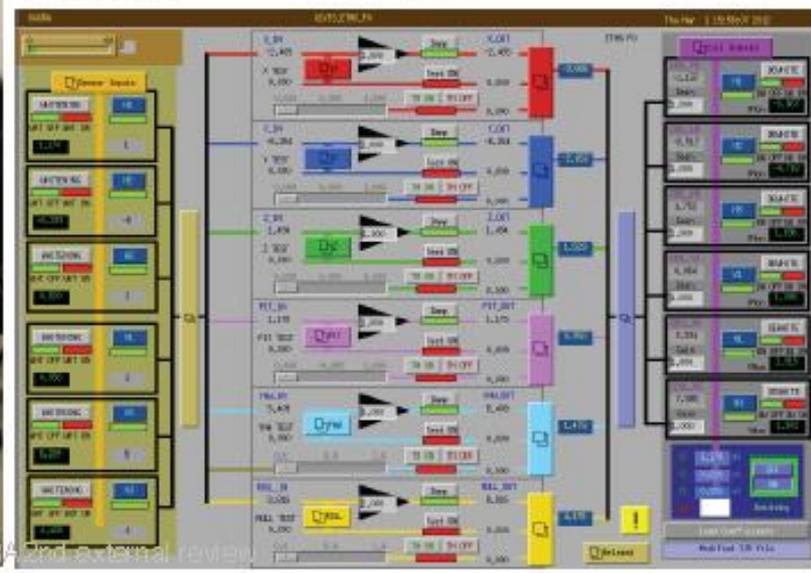
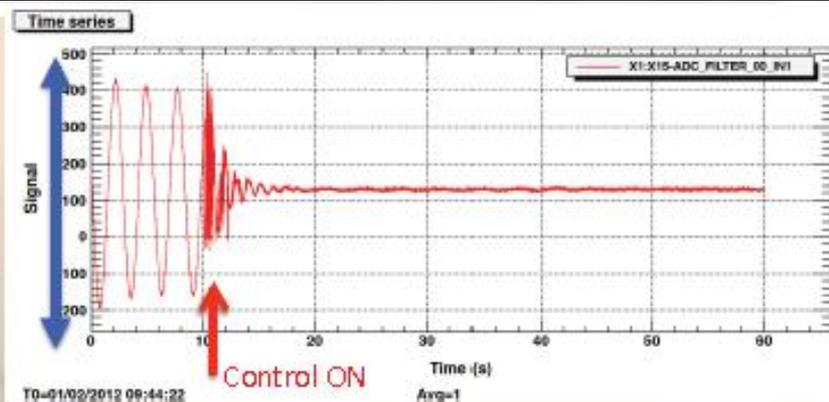
本格的な天文学を目指す → 原理的な雑音源を低減する必要.



KAGRAの組織



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



O. Miyakawa at External Review (April 2012)

干渉計制御・データ取得系

・デジタルシステム

- 干渉計の制御とデータの取得・記録.

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

Fast loop : 16 kHz, 64channel

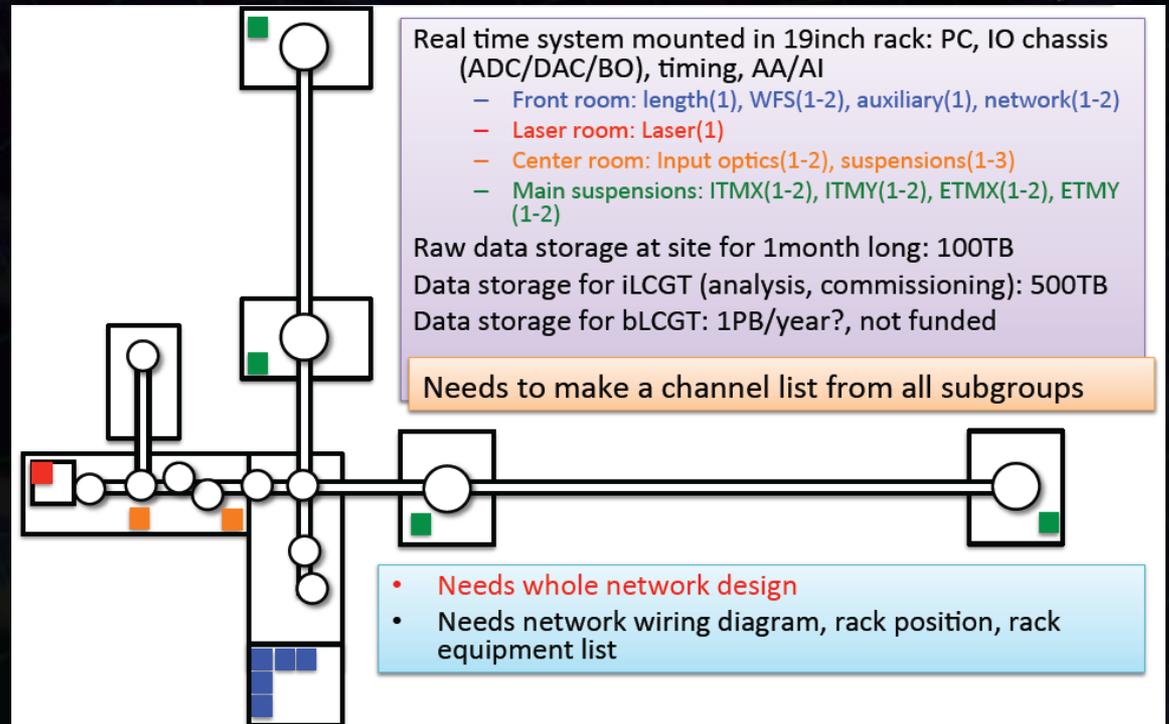
- aLIGOと同等のシステム

→ LIGOの協力のもとCLIOで実証試験.

今年度中に5セットを調達.



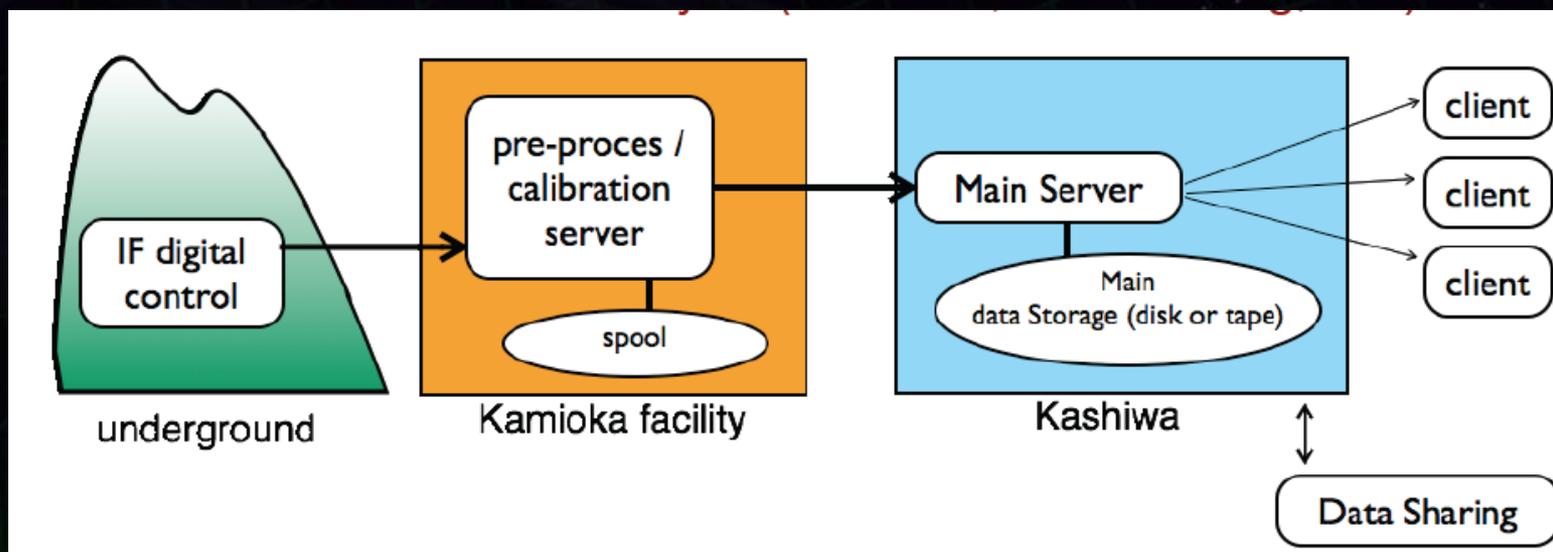
Digital system installed to CLIO



•データの記録と分配

- 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



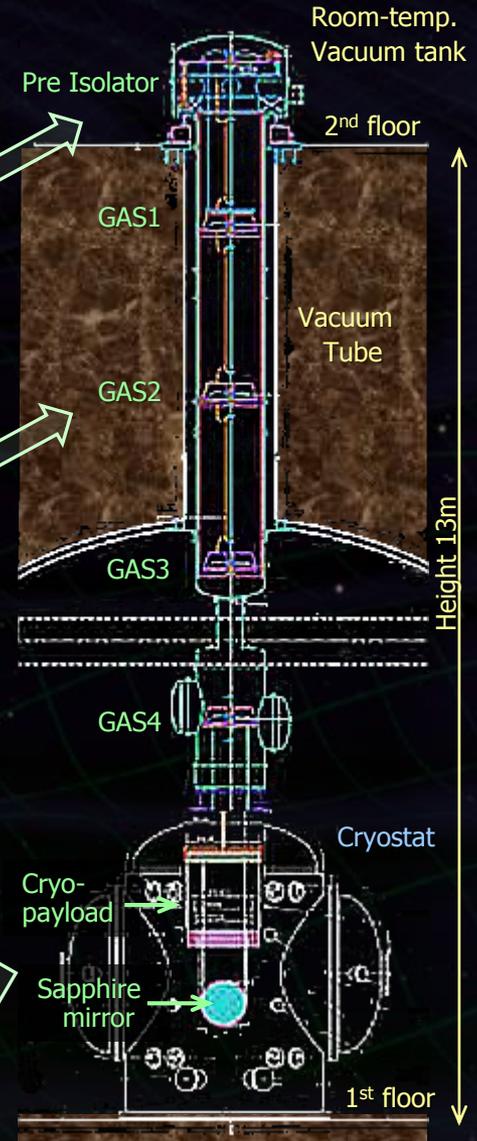
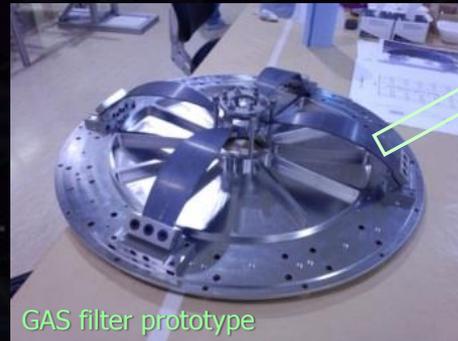
Computing platform and Network

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)

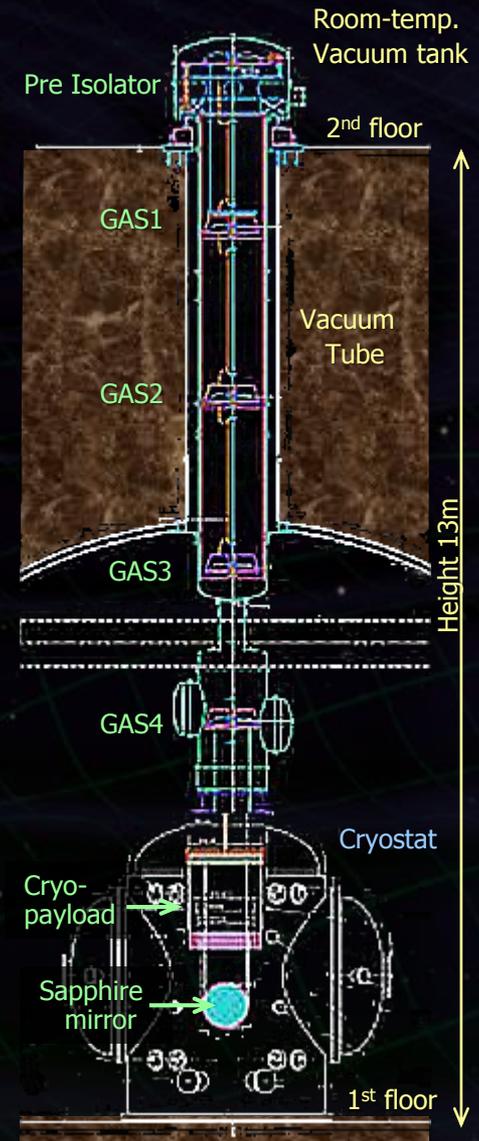
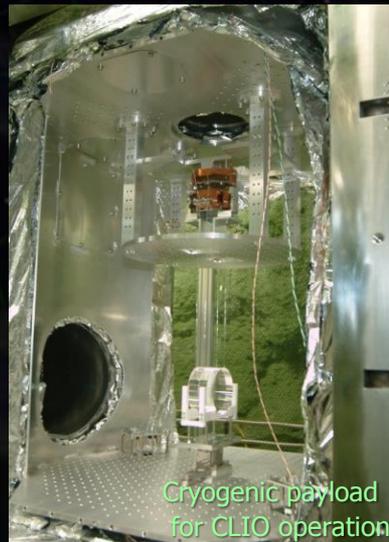
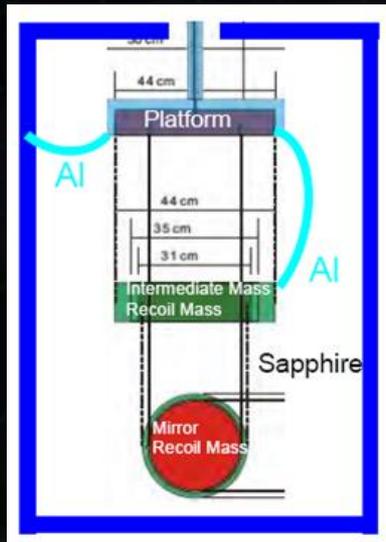


•これまでの干渉計での実績を用いて設計.

- 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)



新しい重力波望遠鏡方式

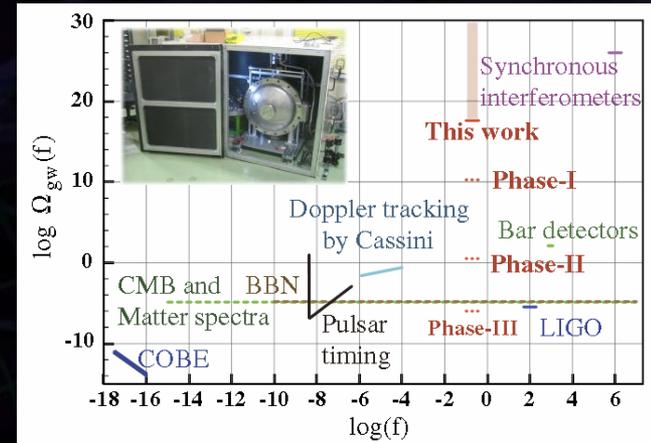
ねじれ型重力波望遠鏡 (TOBA: Torsion-Bar Antenna)

- 新しいアイデアによる重力波望遠鏡方式.
- 低周波数・極低周波数の観測を可能にする.

☆設計検討・プロトタイプ開発.

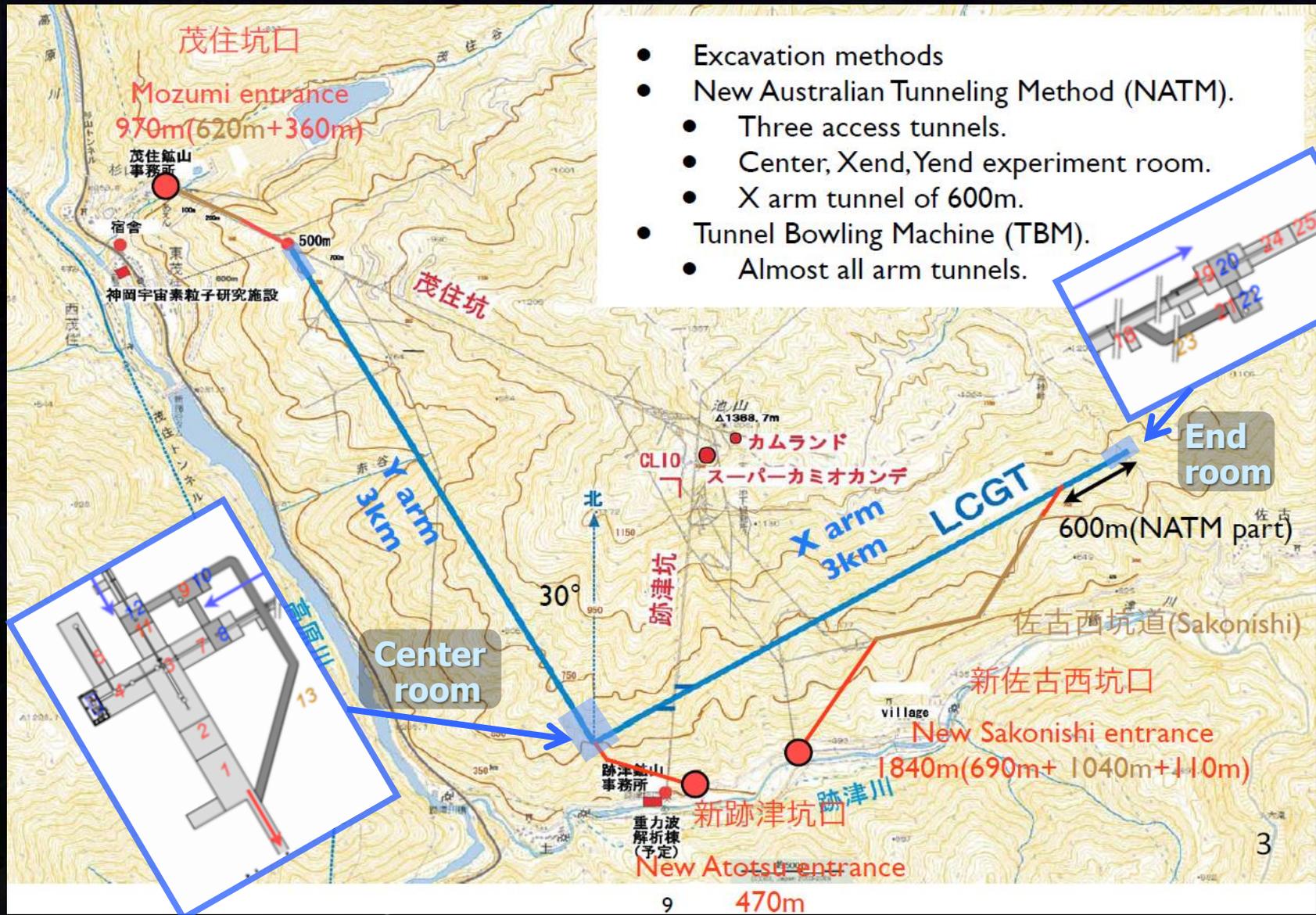
- 小型TOBAの開発と観測運転.
 - 0.2Hz帯の背景重力波に初めての上限値.
- 東京-京都2台での同時観測運転.
- 超小型宇宙実証モジュールSWIM
 - 世界初の宇宙重力波検出器 (2009年)

MA+, PRL (2010), 物理学会誌 (2010)
K.Ishidoshiro MA+, PRL (2011) → ハイライト記事に選ばれる.
石徹白晃治 博士論文 (2009) → 物理学会若手奨励賞 (2011年度)
穀山渉 修士論文 → 東京大学 奨励賞 (2008年度)
A.Shoda GWPAW Poster Award (2010) など



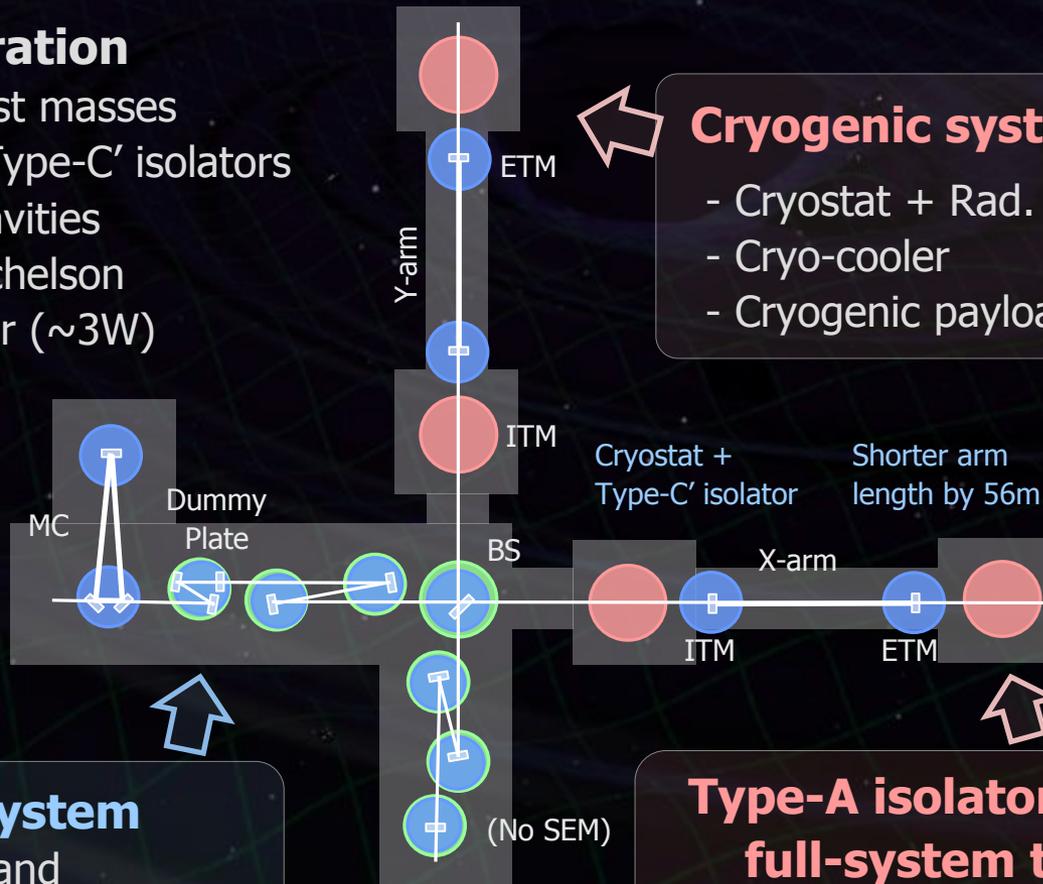
Phys. Rev. Lett. 誌 Highlight記事 (April 2011)

KAGRAトンネル設計



iLCGT configuration

- Room-temp. test masses suspended by Type-C' isolators
- 2.94 km arm cavities
- Fabry-Perot Michelson
- Low laser power (~3W)



Cryogenic system test

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

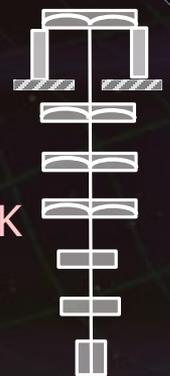
Type-C' system

- Test mass and Core optics (BS, FM,..) Silica, 10kg, 290K
- Seismic isolator Stack + Type-B Payload



Type-A isolator full-system test

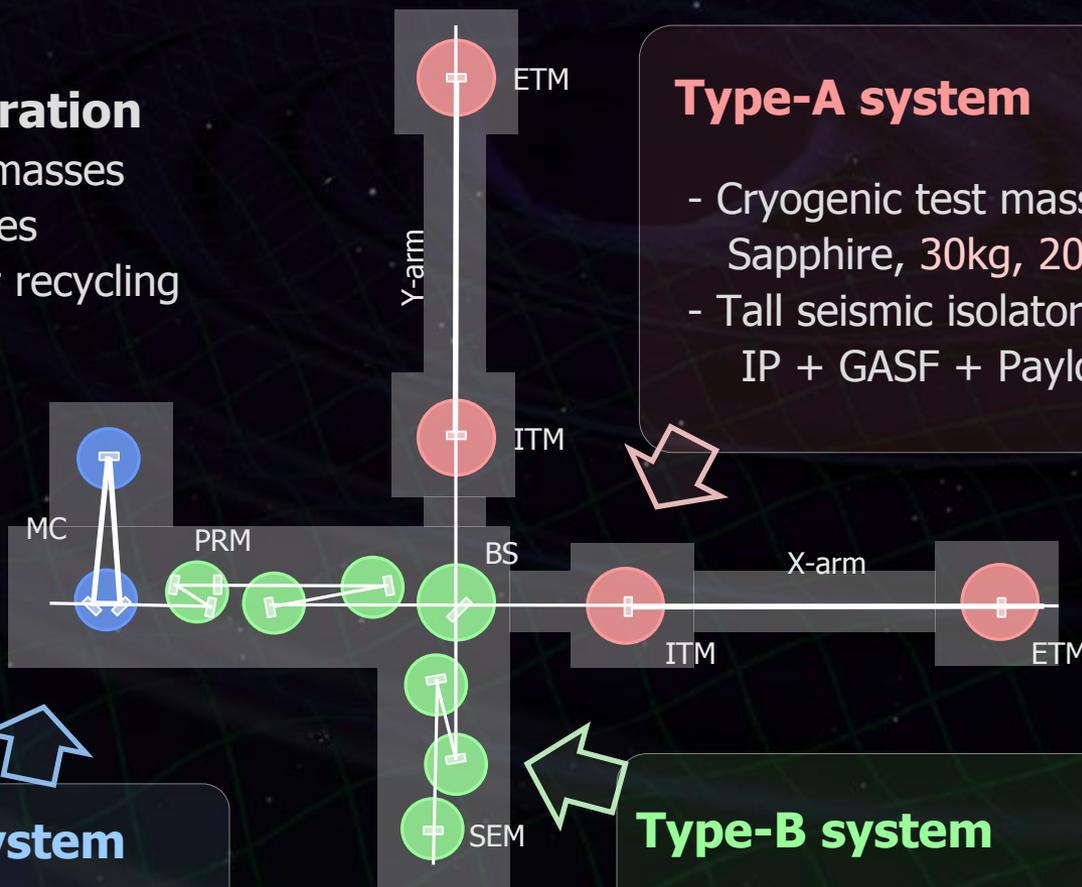
- Room-temp. test Sapphire (?), 30kg, 290K
- Tall seismic isolator IP + GASF + Payload



bLCGT 干渉計構成

bLCGT configuration

- Cryogenic test masses
- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling



Type-A system

- Cryogenic test mass
Sapphire, 30kg, 20K
- Tall seismic isolator
IP + GASF + Payload



Type-C system

- Mode cleaner
Silica, 1kg, 290K
- Stack + Payload



Type-B system

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



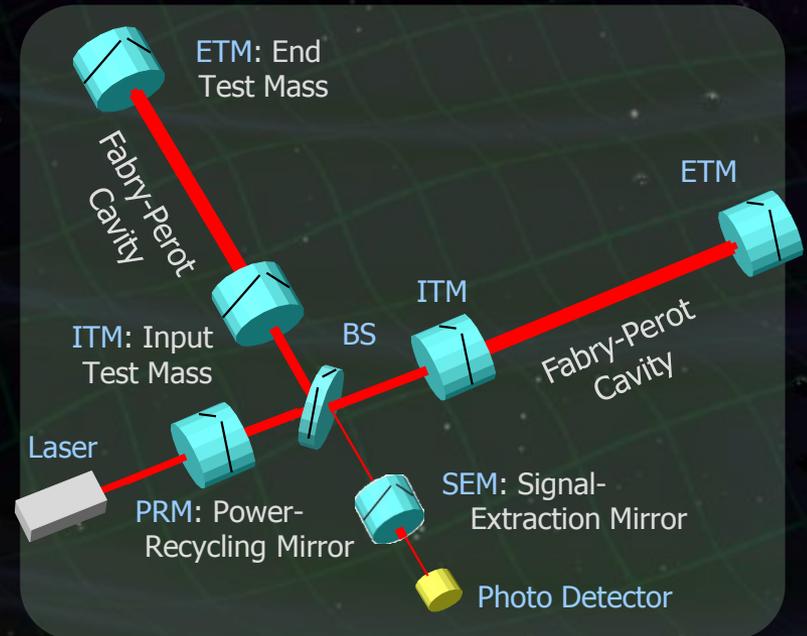
•RSE干渉計方式 (Resonant-Sideband Extraction)

マイケルソン干渉計に鏡を追加

- 腕に ITM : 基線長3kmの Fabry-Perot共振器を構成.
- 入射部に PRM : 干渉計内の光量を増大させる.
- 出射部に SEM : 干渉計ないから信号成分を取り出す.

•RSE方式の利点

- 信号のキャンセルを避けつつ、**大光量**を腕共振器に蓄えることが可能.
- 鏡基材を透過する光量を相対的に低減.
→ **鏡の冷却にとって必須.**
- 観測周波数帯が変更可能.
→ **観測対象に応じて最適化が可能.**



TAMA300および プロトタイプ干渉計による豊富な経験と実績.

- TAMA300の動作・長時間観測運転

- PRFPMI方式 での動作.

- **第1世代干渉計としての実績.**

- 2000-2002年 世界最高感度

- 3000時間を超える観測データの蓄積

TAMA300



- プロトタイプ干渉計によるRSE方式の研究

- NAOJ 4m干渉計, Caltech 40m干渉計

- ⇒ **RSE干渉計の安定動作の実現.**

- RSEの原理を実証.

- (信号成分の取り出し, 観測帯域の調整)

- ⇒ **RSE干渉計技術は確立されている.**

- シミュレーション等を用い, 光学設計・制御性設計進行中.

4m RSE prototype at NAOJ



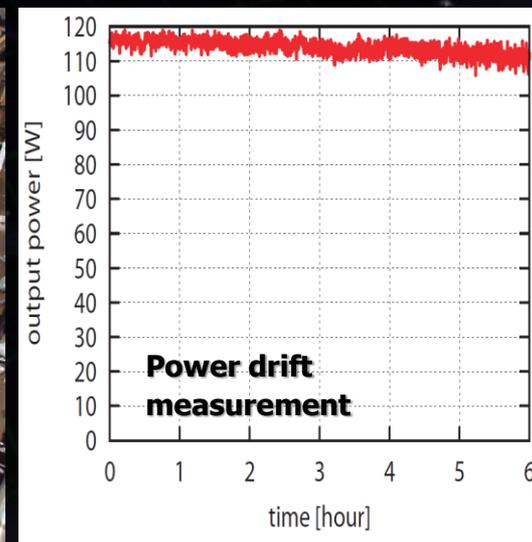
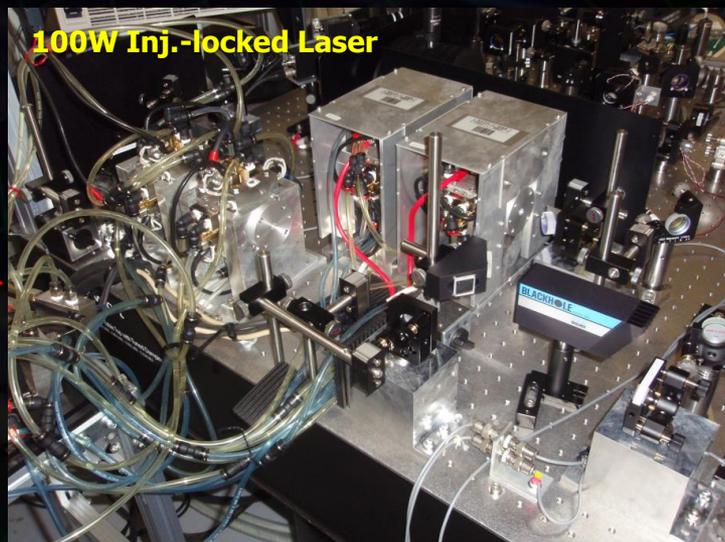
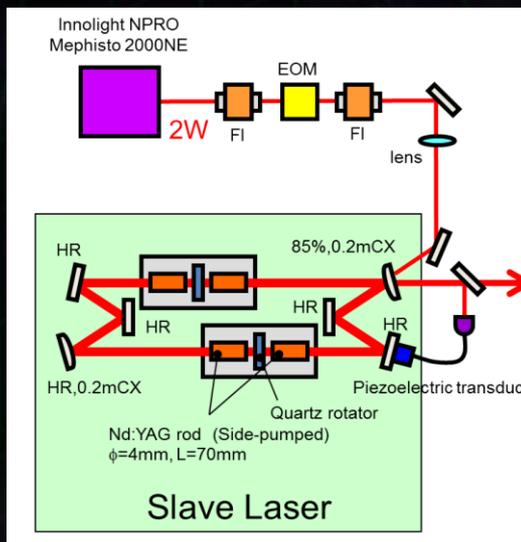
高出力光源の開発

100Wレーザープロトタイプの開発・試験 (東京大・新領域)

・固体レーザーモジュール 2台により注入同期レーザー

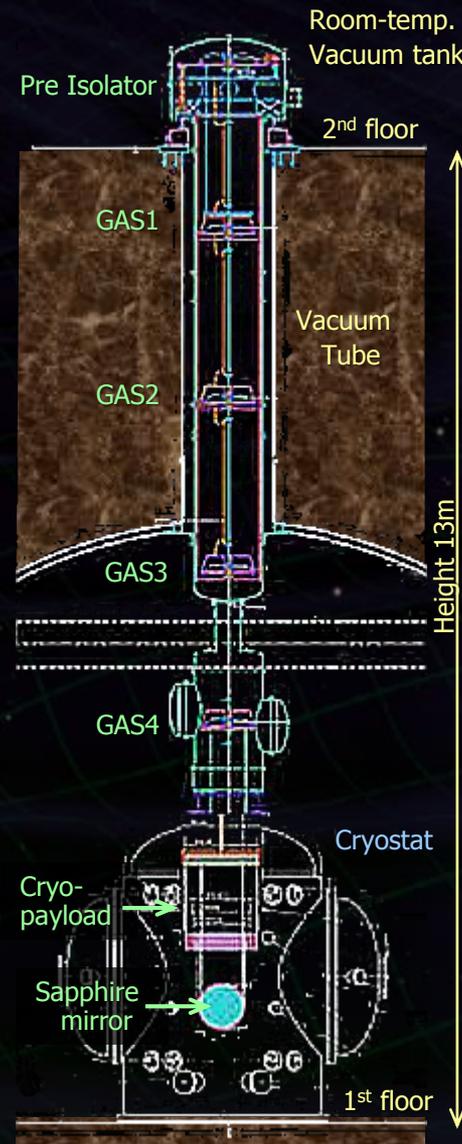
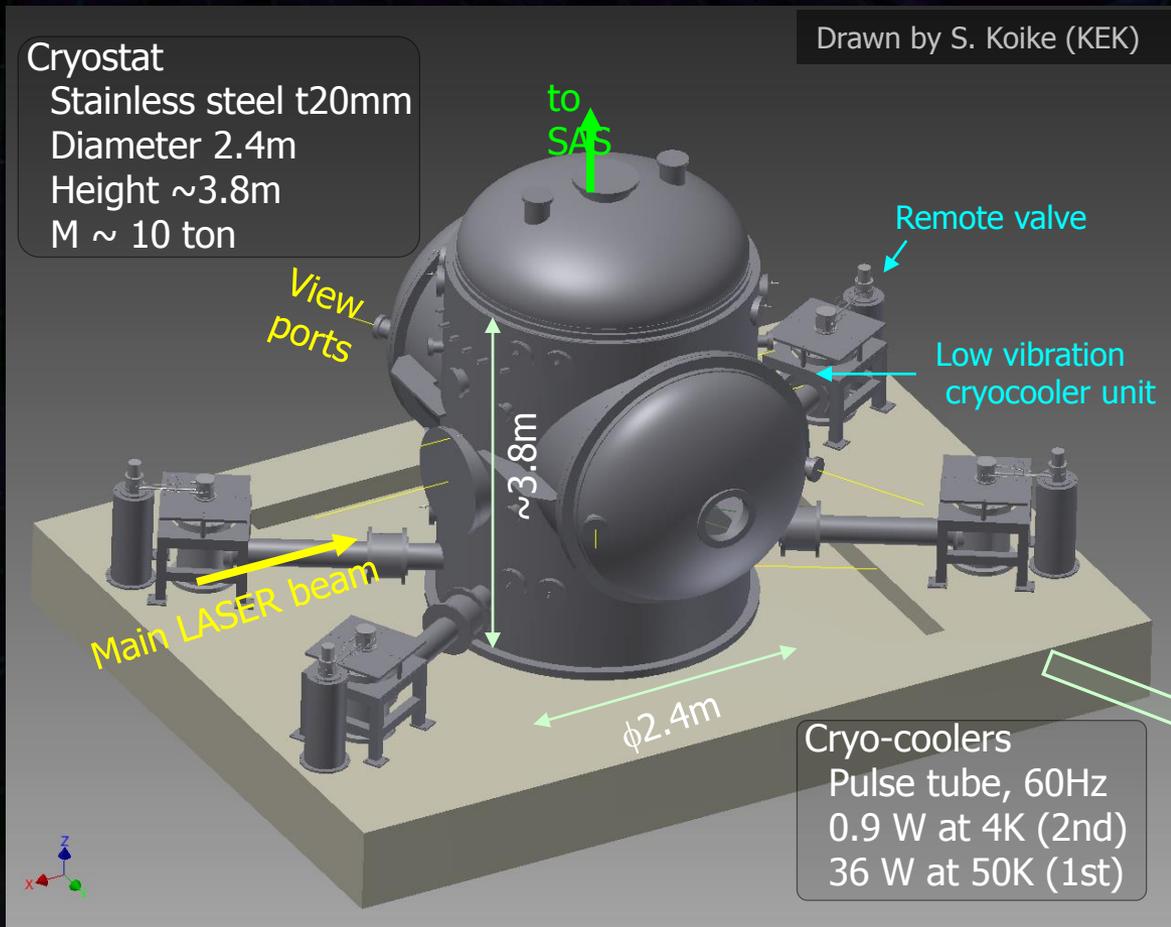
- 長時間安定動作を確認, 出力光の品質評価.
- 外部共振器レファレンスを用いた周波数安定化 → 要求値を満たす.
- 強度安定化実験 → 制御性を確認.

⇒ 基本特性を確認. 実機の手配進行中.



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.



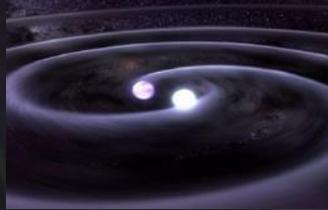
宇宙重力波望遠鏡のターゲット

宇宙重力波望遠鏡 -- 0.1mHz – 1 Hz の観測周波数帯

⇒ 中間/巨大ブラックホール, 初期宇宙

中性子星・白色矮星

連星



パルサー



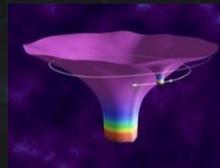
定常的・準静的な自転・公転運動

ブラックホール



巨大ブラックホールの合体

EMRI

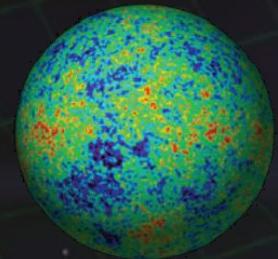


準固有振動

初期宇宙

多数天体の重ね合わせ

背景重力波



電磁波
ニュートリノ

同時観測
数値相対論

重力理論の検証

超巨大BHの形成過程
銀河形成史

宇宙論, 宇宙の誕生と発展
ダークエネルギー・ダークマター

成功確率

1年間の観測で、少なくとも1回以上
重力波を検出できる確率: **99.9%**

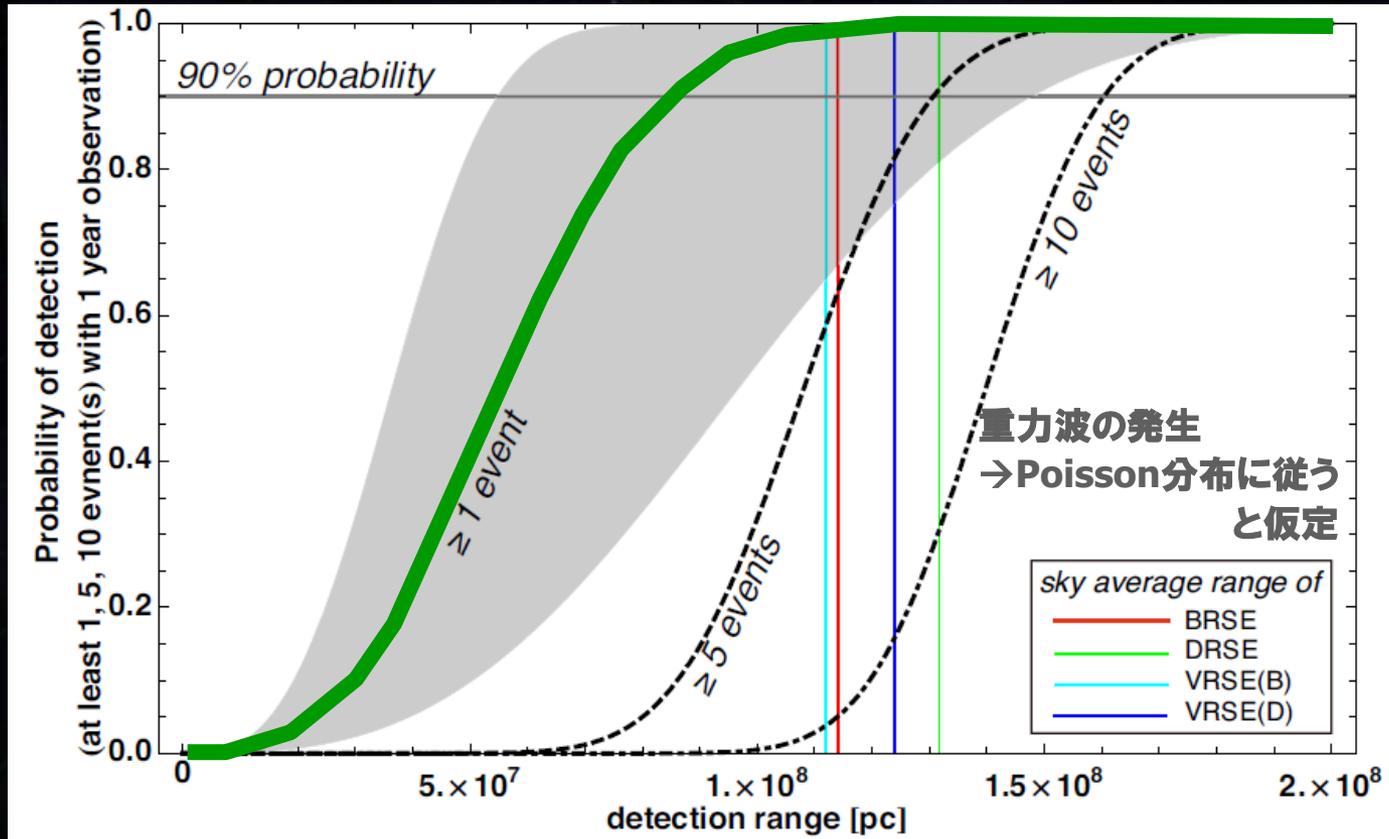


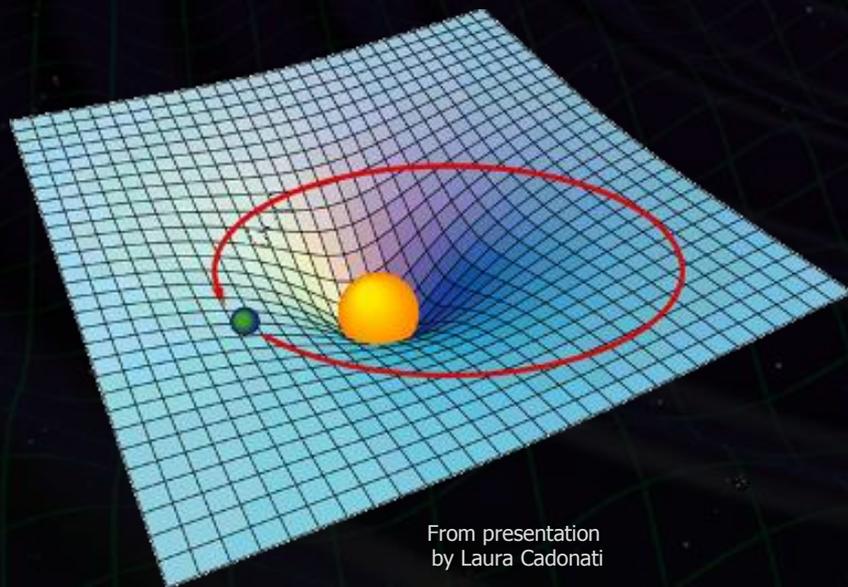
Figure
N.Kanda

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."*

John Archibald Wheeler



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

LCGT (JPN)

1 detector (3km)

Long baseline
Better seismic
attenuation system
Underground site

Low-mechanical-loss
mirrors and suspensions
Cryogenic (20k)

High-power laser source
Low-loss optics
Variable RSE config.

Scale

Seismic noise
reduction

Thermal noise
reduction

Quantum noise
reduction

Advanced LIGO (USA)

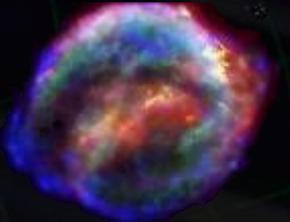
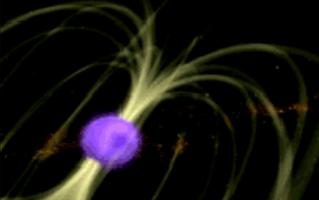
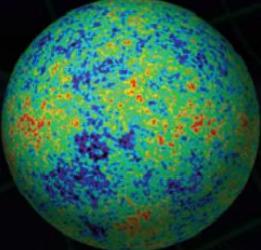
3 detectors (4km)
(2 close, 1 separated)

Long baseline
Better seismic
attenuation system
Suburban site

Low-mechanical-loss
mirrors and suspensions
Large beam size

High-power laser source
Low-loss optics
Detuned RSE config.

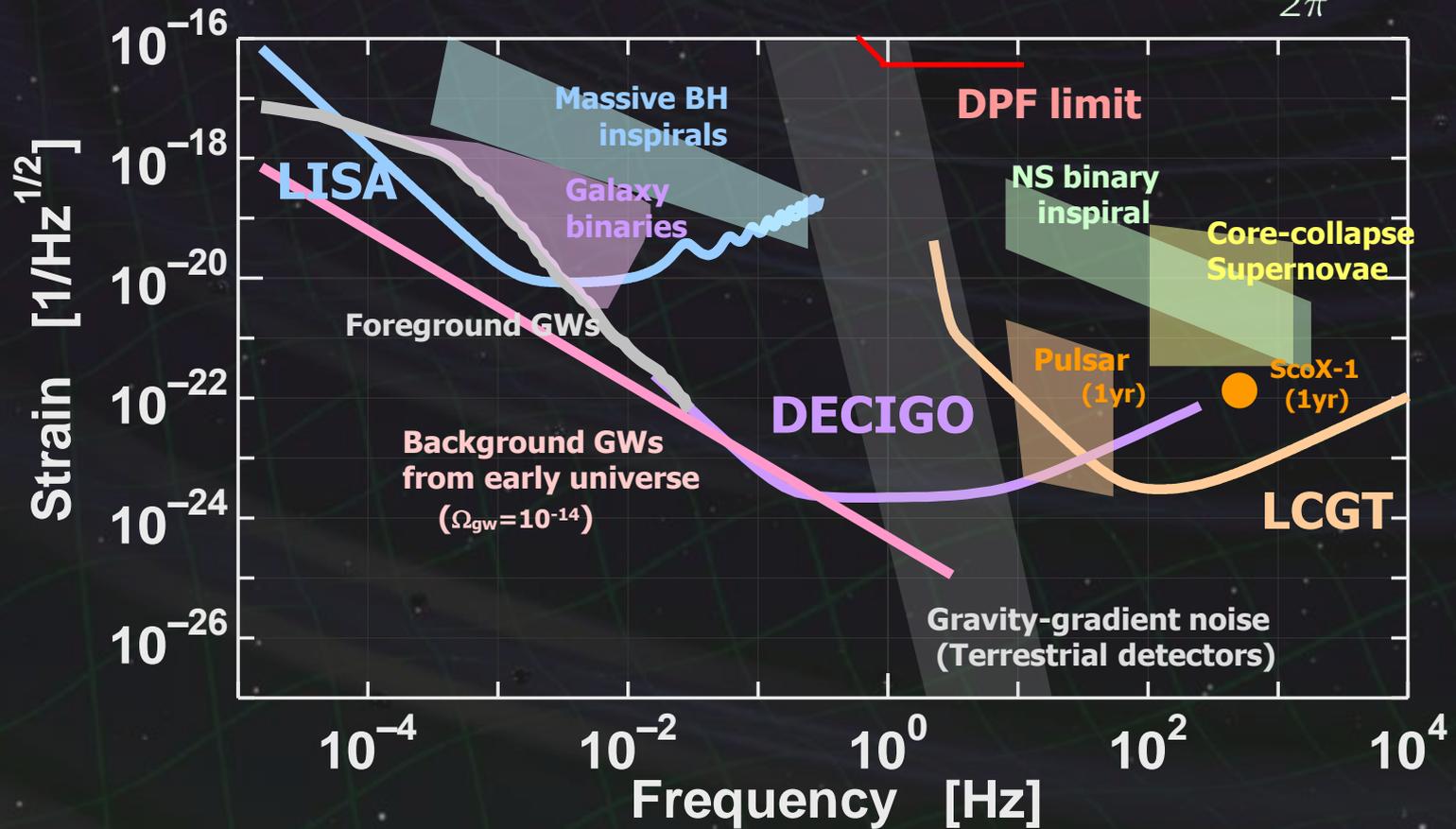
GW targets and data analysis

		Signal duration	
		Short (bursts)	Long (stationary)
Waveform	Known	 <p>Binary merger → Chirp wave, Ringdown wave</p>	 <p>Pulsar, LMXB → Continuous</p>
	Unknown	 <p>Stellar core collapse → burst wave</p>  <p>Soft gamma-ray repeater</p>	 <p>Stochastic background → Random wave</p>

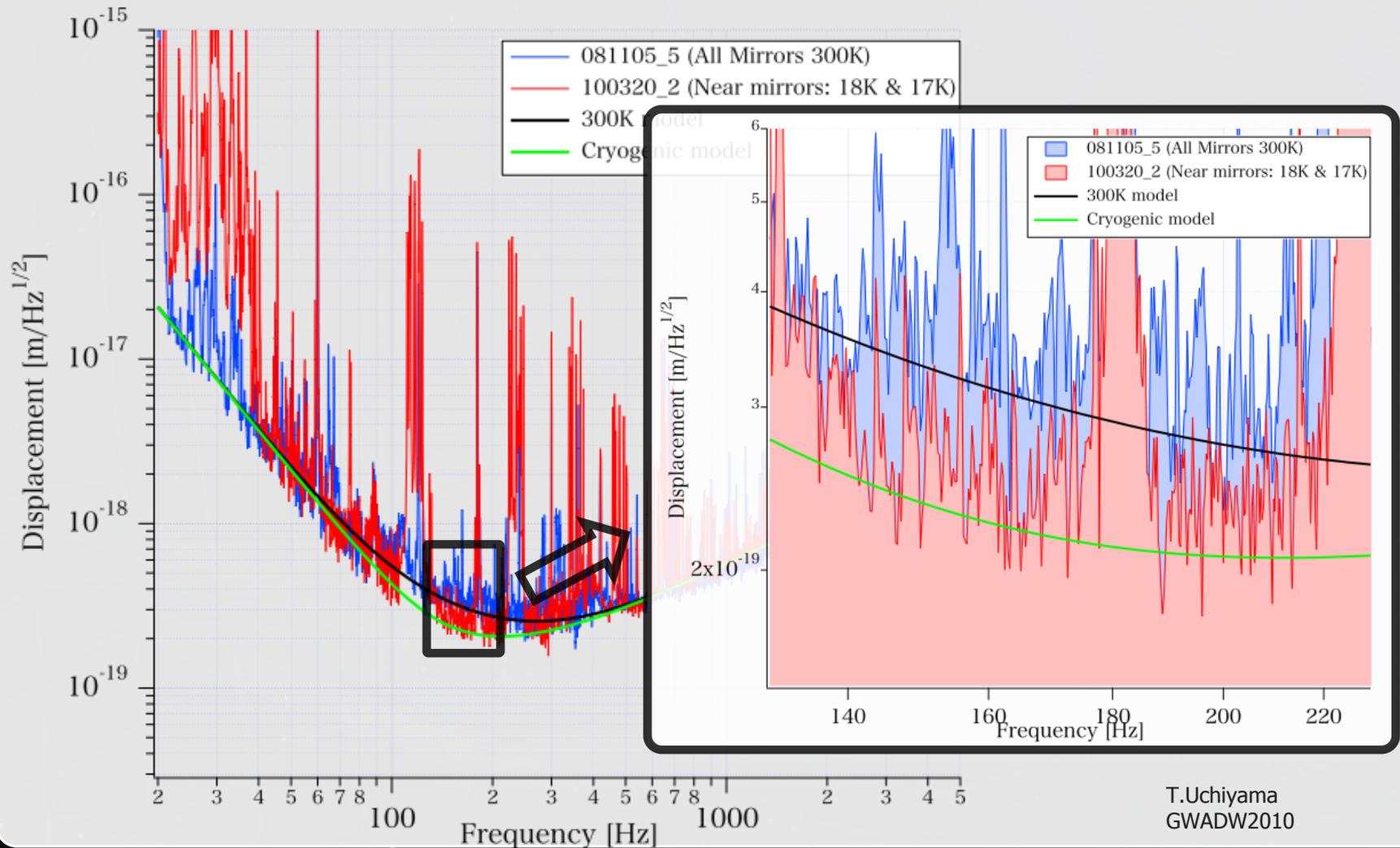
DPF sensitivity

DPF sensitivity $h \sim 2 \times 10^{-15} \text{ Hz}^{1/2}$
(x10 of quantum noises)

$$f \sim \frac{1}{2\pi} \sqrt{GM/R^3}$$



Sensitivity improvement with cryogenic operation



重力波はある???

- 観測による証明 -



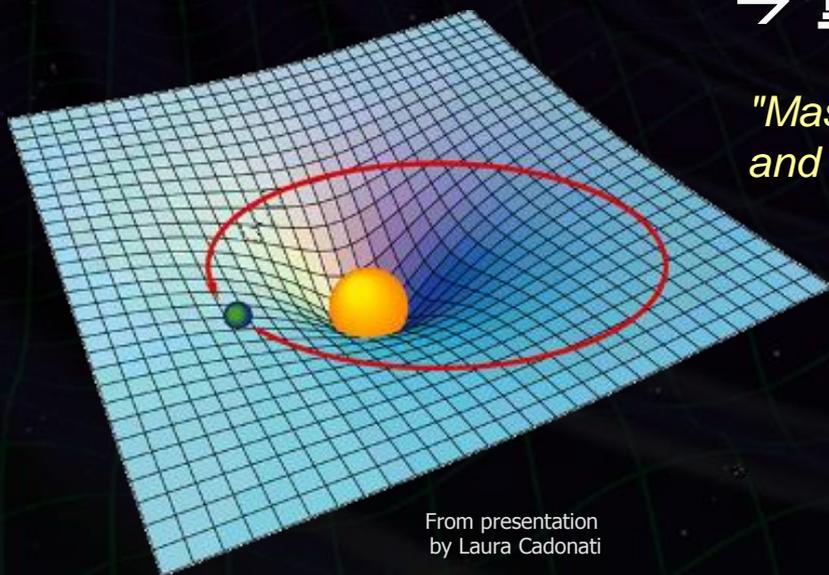
重力波による天文学???



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

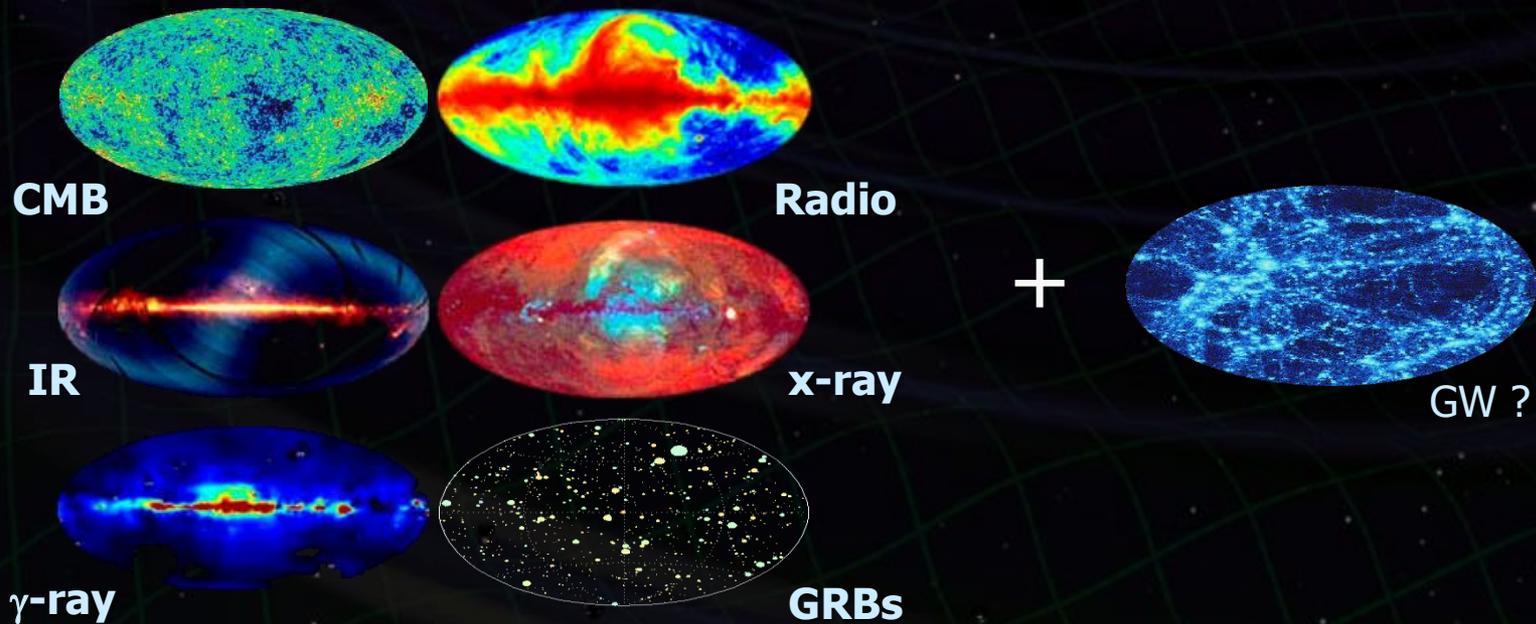
→ 重力場の変動

→ '時空のさざなみ'として伝播



重力波

宇宙を観測する新しい手段 → 新しい発見!!!



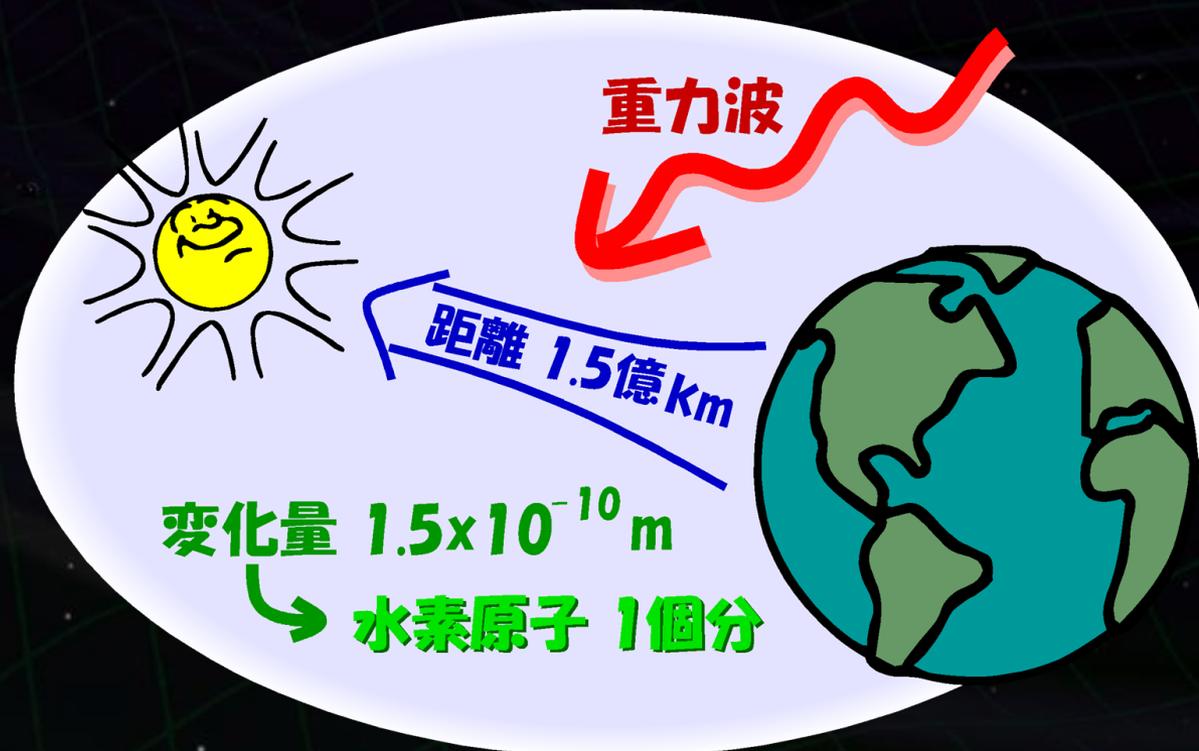
(例) 地球-太陽間の距離変動

距離 1.5×10^{11} m

重力波振幅 10^{-21}



1.5×10^{-10} m の距離変動



時空の幾何は、微小距離離れた2点間の線素に集約.

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

↑
4次元線素

↑
計量テンソル
(Metric Tensor)



アインシュタイン テンソル $G_{\mu\nu}$ も
(アインシュタイン方程式の左辺)
計量テンソル $g_{\mu\nu}$ を用いて表わされる.

4次元直交座標

$$dx^0 = cdt, \quad dx^1 = dx$$

$$dx^2 = dy, \quad dx^3 = dz$$

4次元の平坦な時空

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

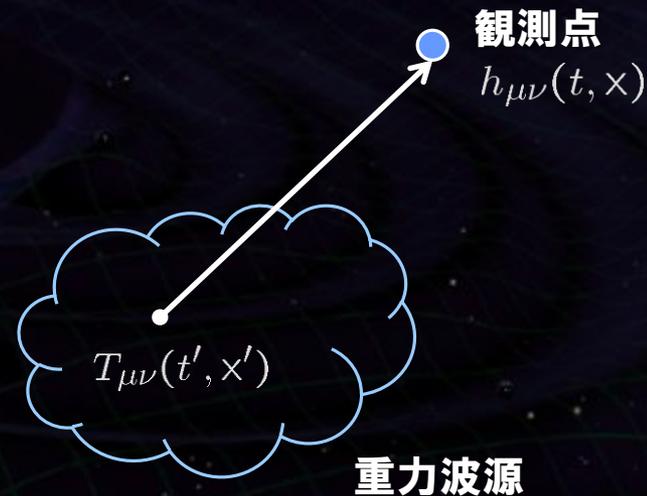
線形化されたアインシュタイン方程式

$$\square h_{\mu\nu} = -2\kappa T_{\mu\nu} \quad \left[\kappa = \frac{8\pi G}{c^2} \right]$$

遅延解

$$h_{\mu\nu} = \frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{[T_{\mu\nu}(t', \mathbf{x}')]_{\text{ret}}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} dV'$$

($t' = t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c$)



低速度, 十分遠方
として近似

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij} \quad \left[I_{ij} = \int \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} r^2 \right) dV' \right]$$

四重極モーメントの
時間2階微分

質量分布の四重極モーメント

- 波源のエネルギー・運動量保存側 → 双極子放射はない
(波源での双極子モーメントが0になる座標がある)

平坦な時空からの摂動

$$g_{\mu\nu} = \underbrace{\eta_{\mu\nu}}_{\text{平坦な時空}} + \underbrace{h_{\mu\nu}}_{\text{微小な曲率}}$$

真空中の波動方程式

(線形化されたアインシュタイン方程式)

$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

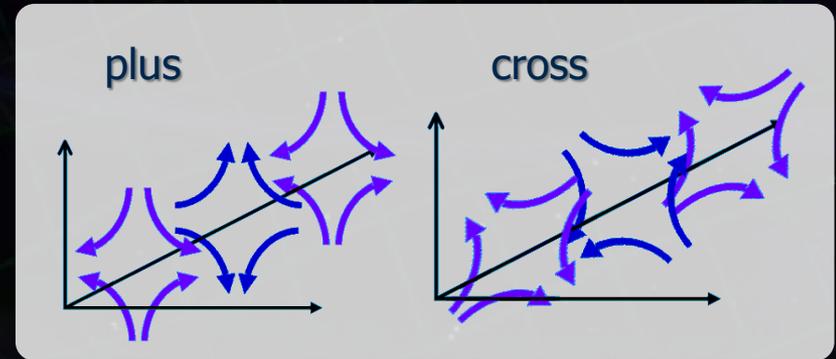
平面波解 (横波) : 重力波

$$h_{ij} = A_{ij} \times \exp [i(\omega t - kz)]$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2つの偏波 :

Plus mode, Cross mode



重力波振幅：波源の四重極運動エネルギーに比例

$$\ddot{I}_{ij} \sim \frac{(\text{Mass}) \times (\text{System size})^2}{(\text{System transit time})^2}$$

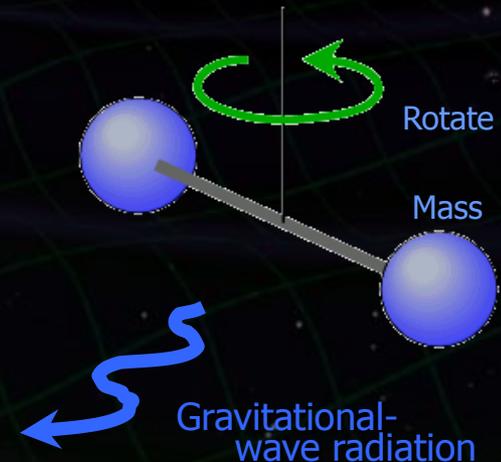
~ (Quadrupole kinetic energy)

重力波の周波数

4重極モーメントの時間変動のスケール

$$f_{\text{GW}} \sim \frac{(\text{System velocity})}{(\text{System size})}$$

回転体の場合 --- 回転周期の2倍



(例) 連星合体からの重力波

コンパクト連星からの重力波

重力波振幅 $h \sim \frac{4G^2}{c^4 r} \frac{m_1 m_2}{R}$

Separation Mass



周波数 $f \sim \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G(m_1 + m_2)}{R^3}}$



準定常的な正弦波形 → チャープ波 → 合体時のバースト波 → リングダウン波

(例) 連星合体からの重力波

チャープ波

時間と共に振幅・周波数が増大していく。
→最終的に合体, BHになる。

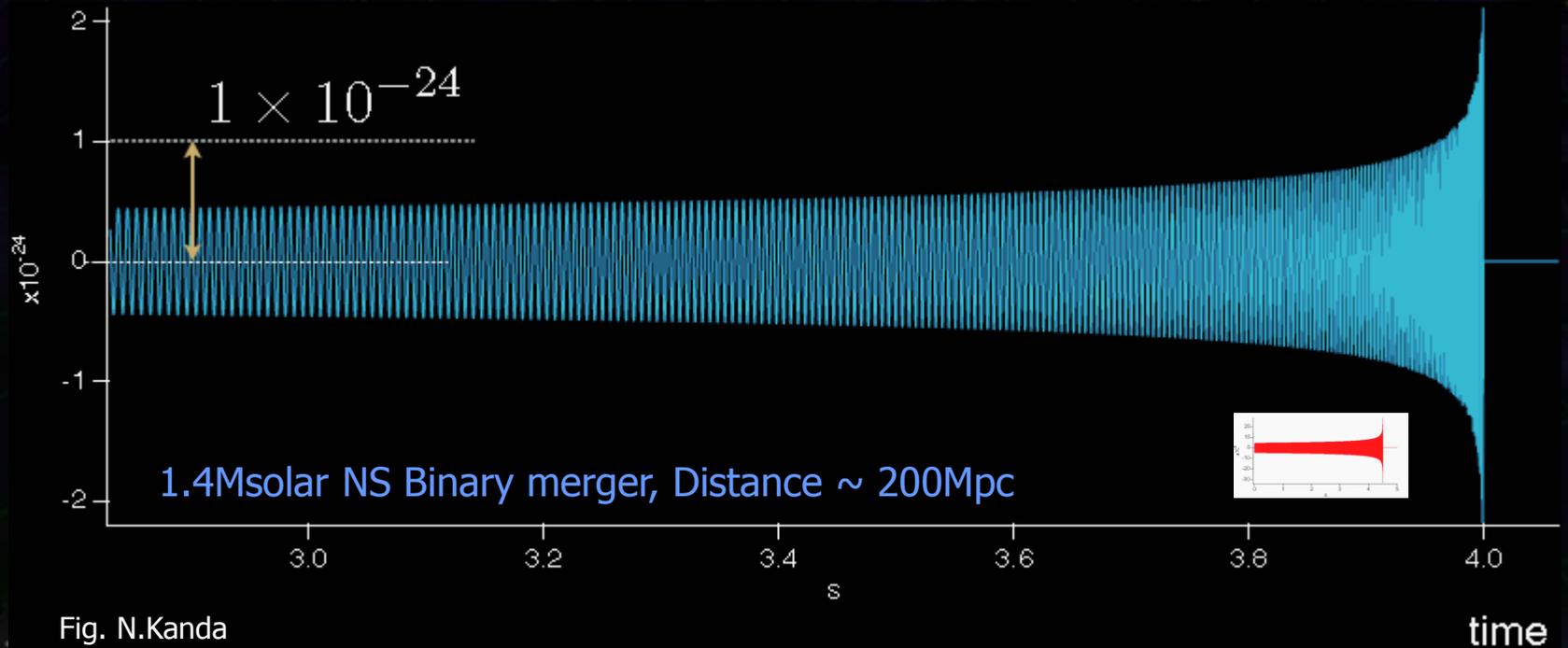
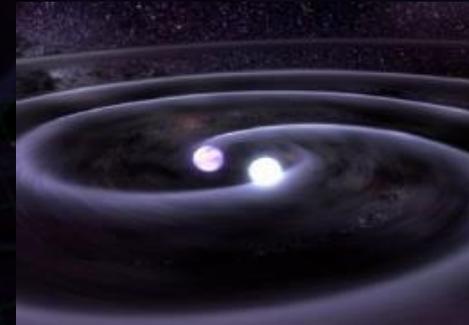


Fig. N.Kanda

・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.

観測できたら???

- 観測で期待できる知見 -

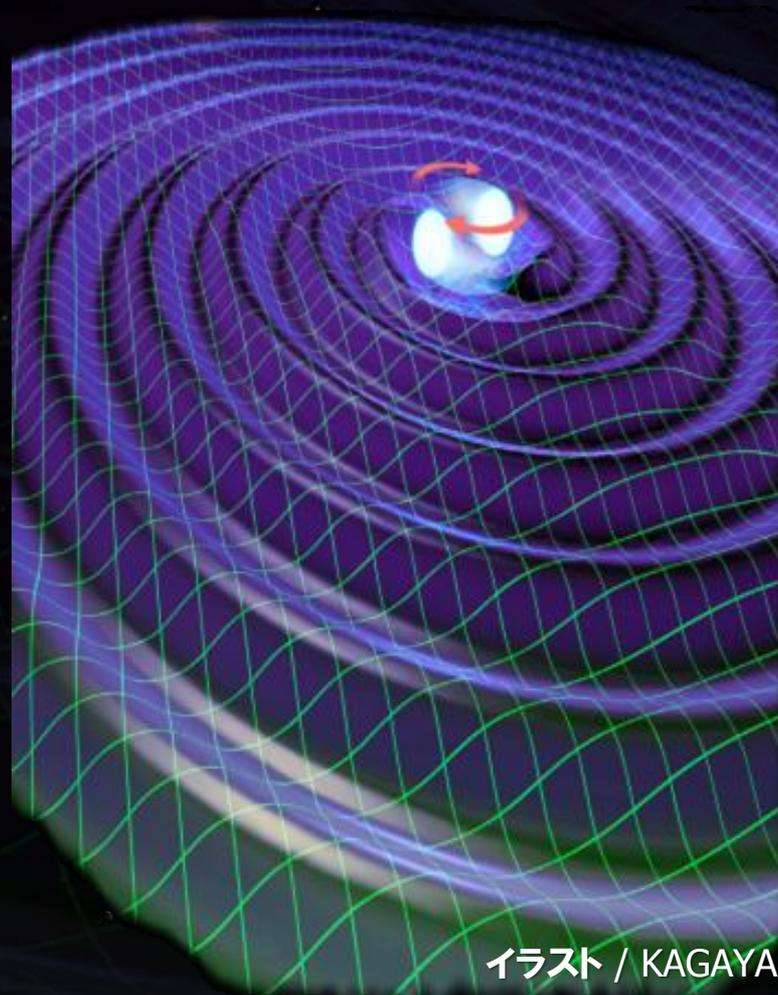


イラスト / KAGAYA

• 重力波の初検出

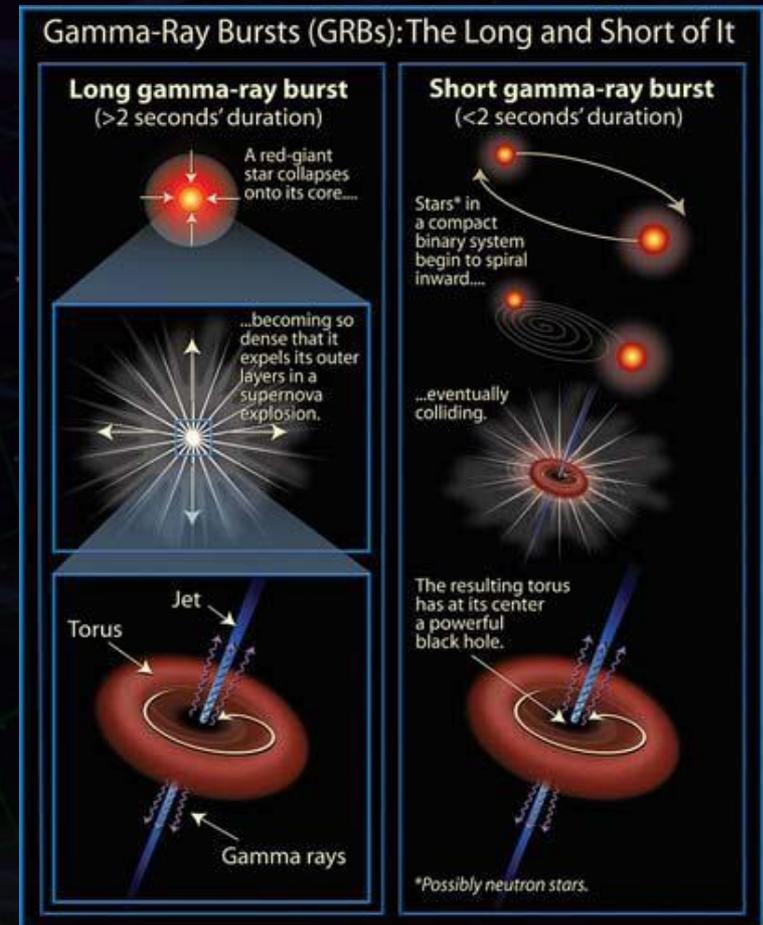
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生。
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

⇒ 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。

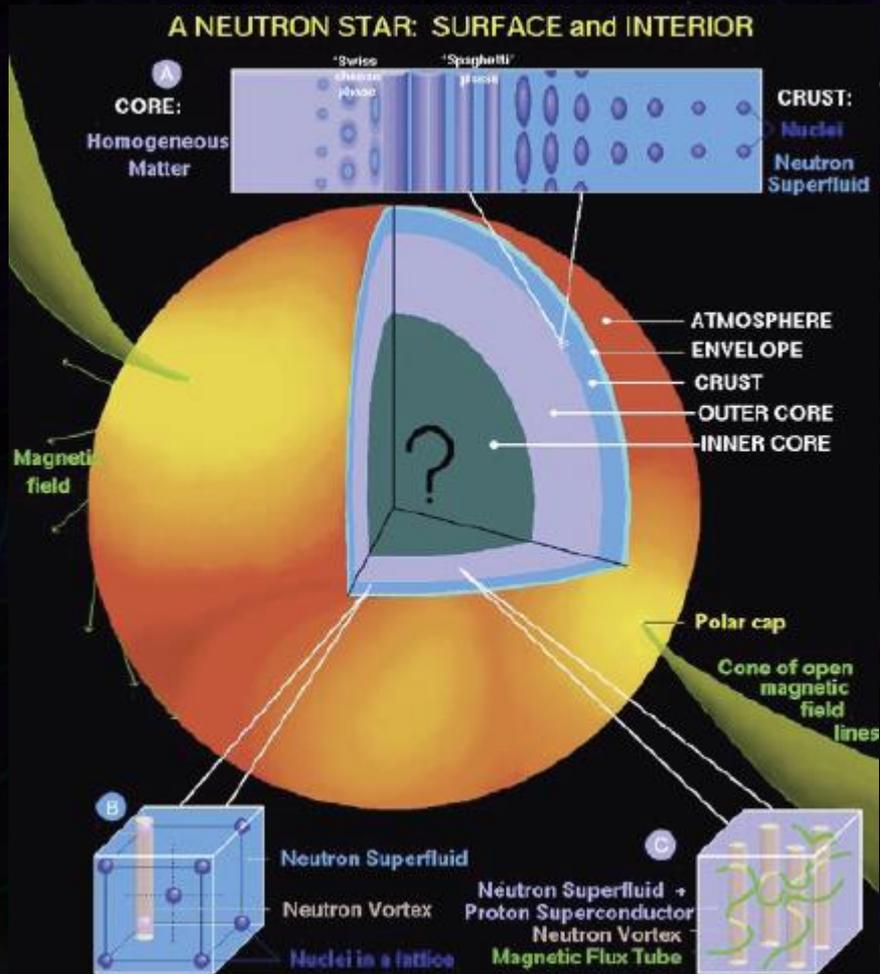
• 宇宙論・銀河形成史に対する知見

- 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, 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

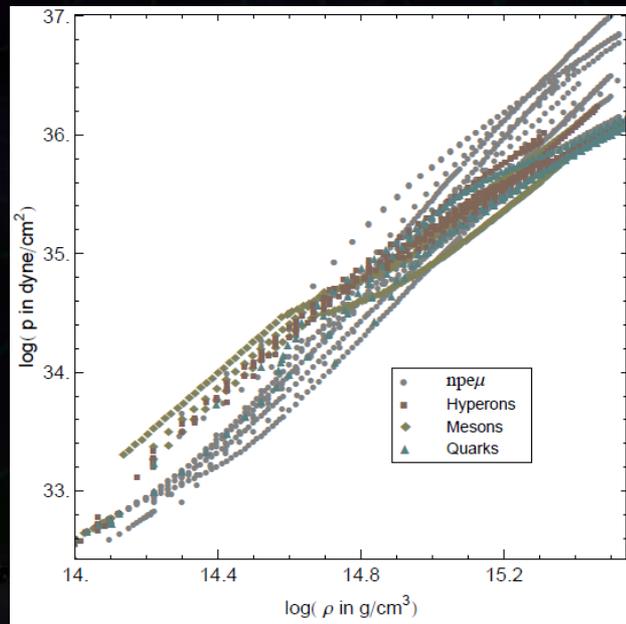
$$\rho_0 = 2.8 \times 10^{17} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

核密度以上の性質は
ほとんど理解されていない。

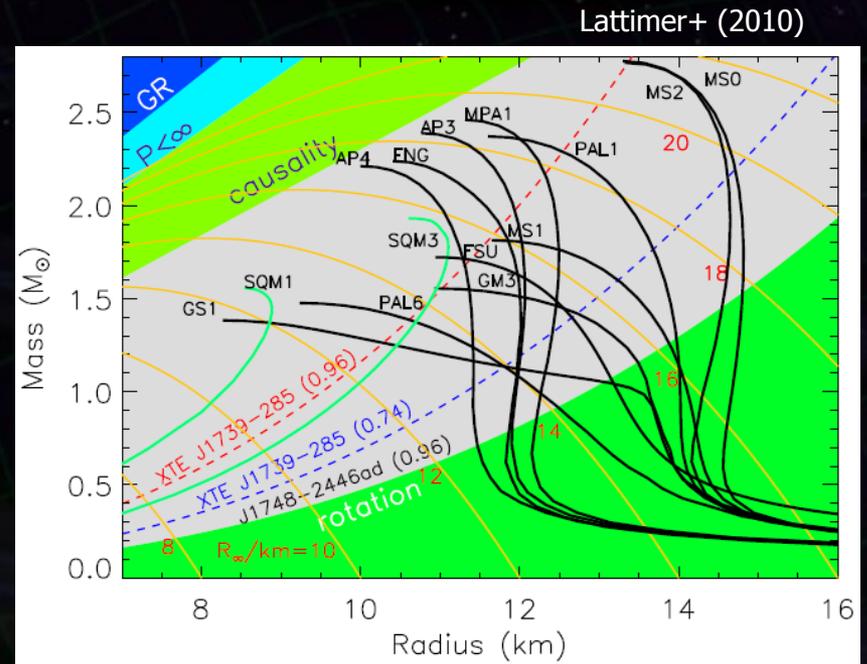
中性子星の状態方程式

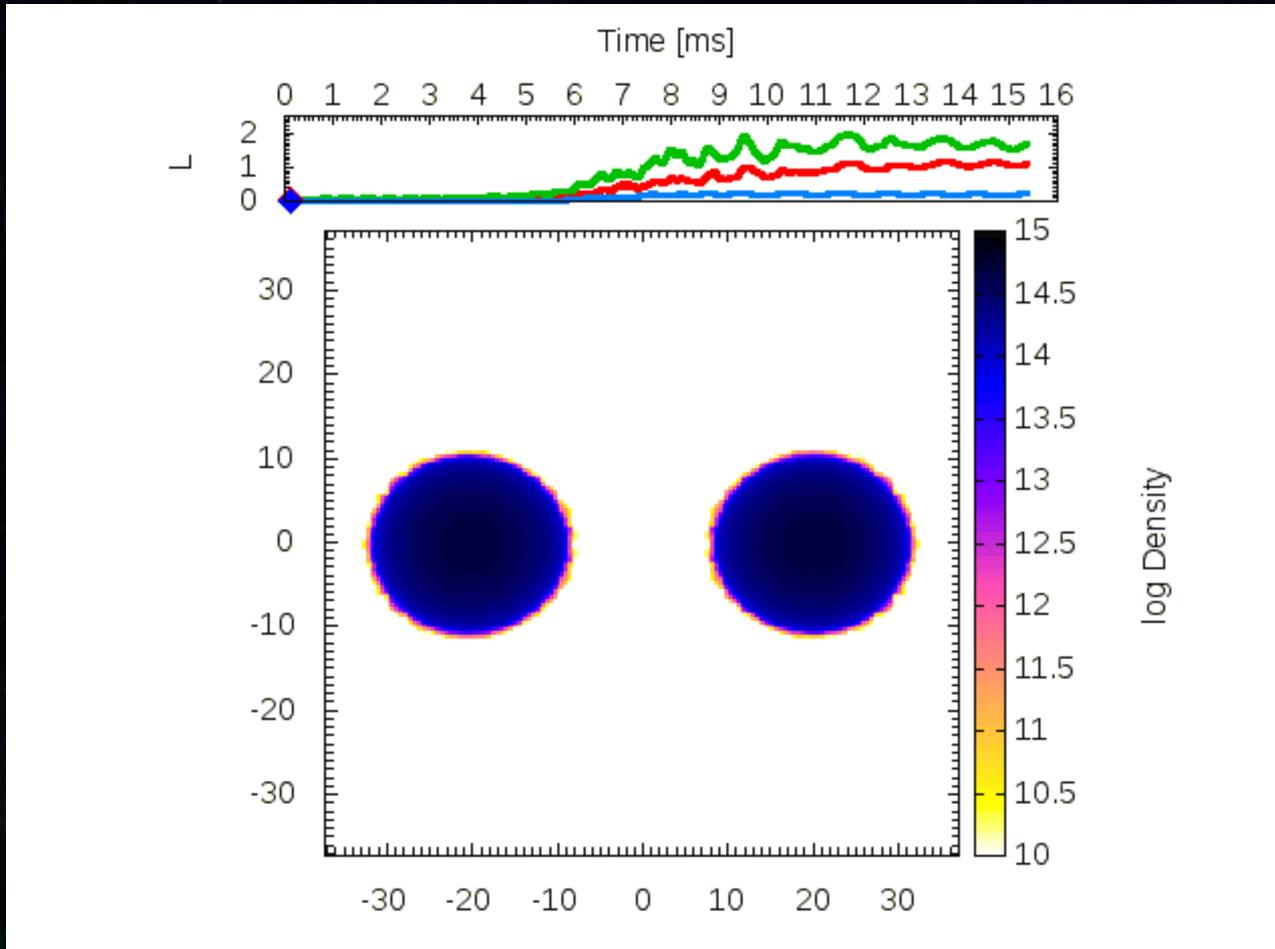
高密度核物質の状態方程式 (EoS, Equation of State)

- 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

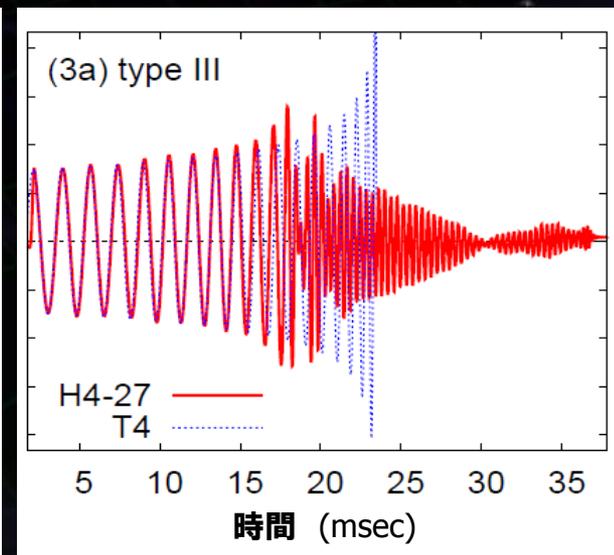
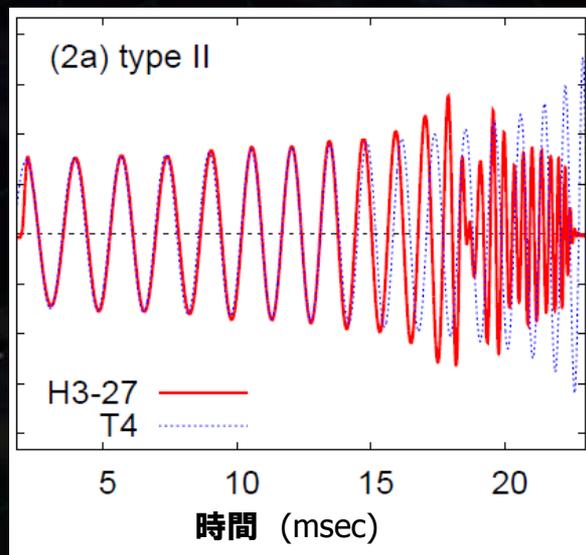
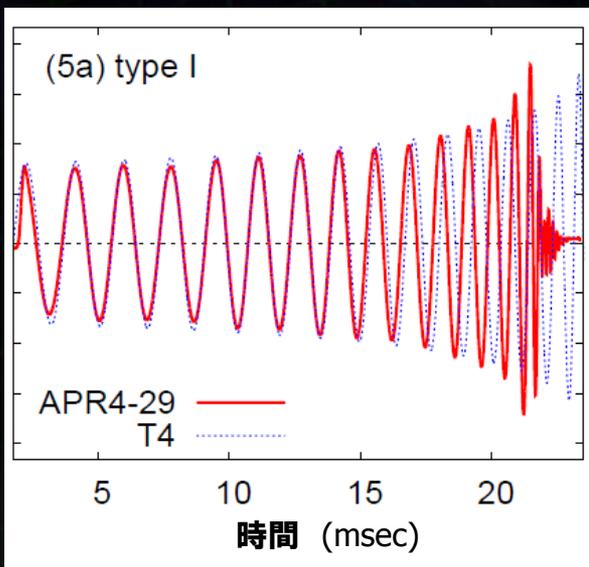
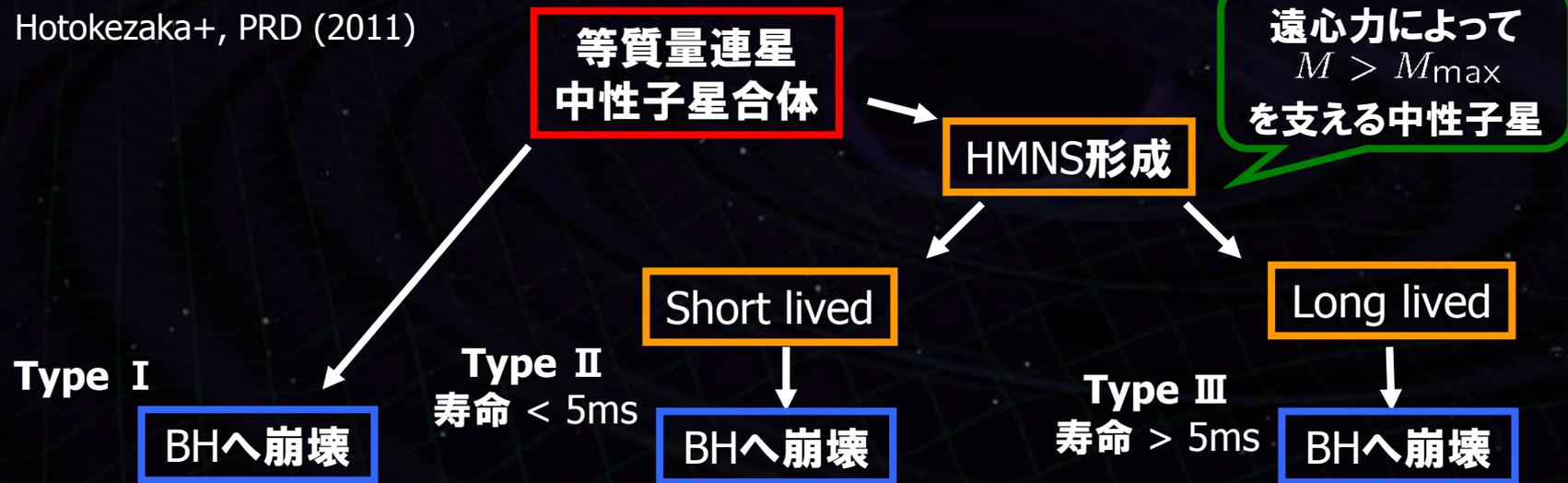




連星中性子星の合体数値シミュレーション by 関口氏

中性子星連星合体の数値シミュレーション

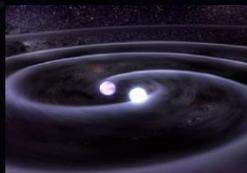
Hotokezaka+, PRD (2011)



重力波望遠鏡の高感度化

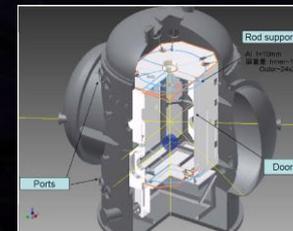
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



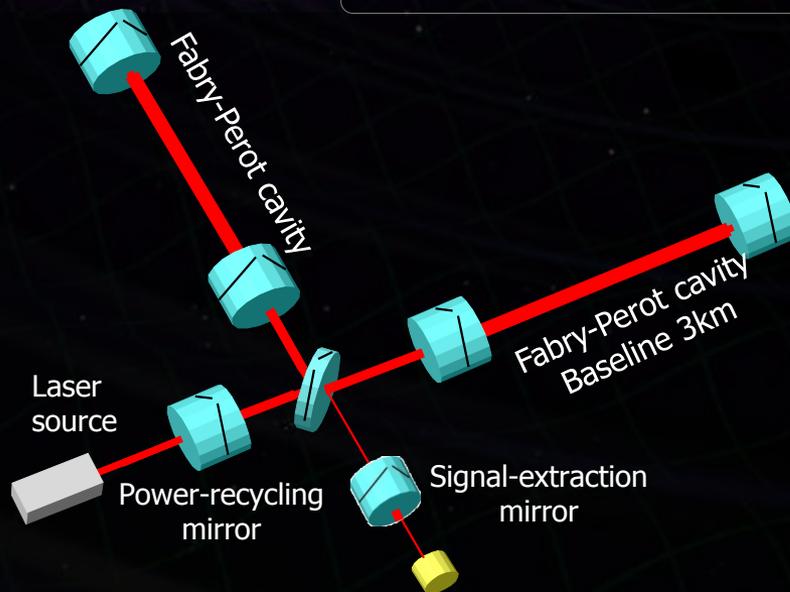
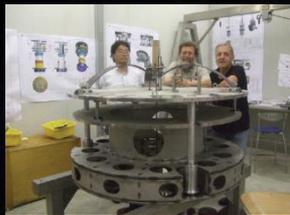
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



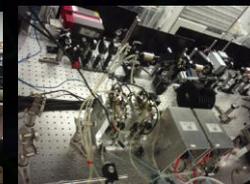
・地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



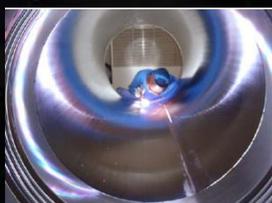
・光の量子雑音

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

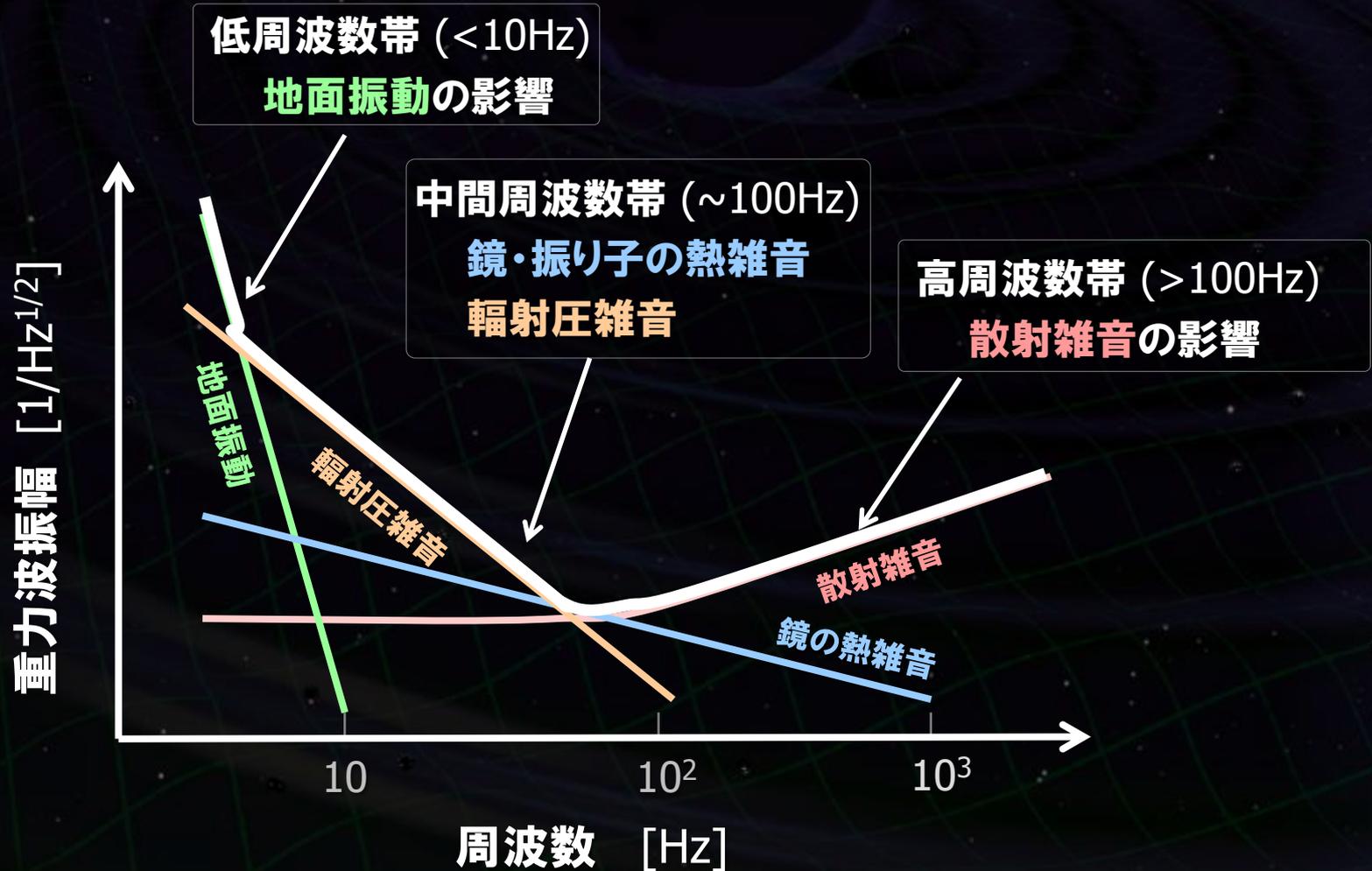


・長期・連続観測

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 光が光子の集合であることに起因した統計揺らぎ。

- **散射雑音** (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

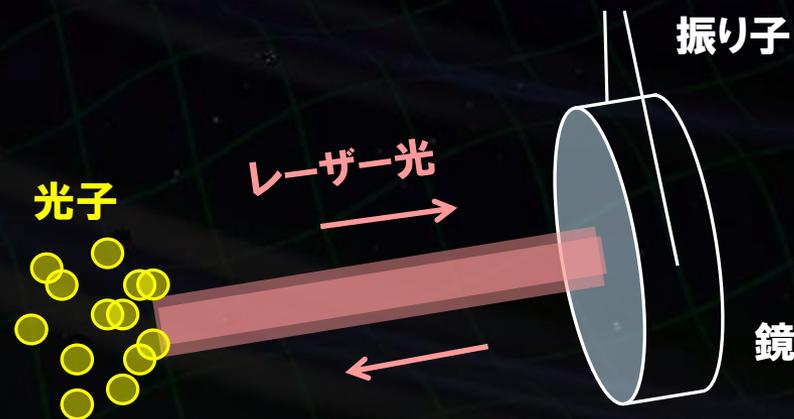
$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- **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]



光 (輻射場) の不確定性関係

散射雑音 : 光の位相雑音

$$\delta h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

輻射圧雑音 : 光の振幅雑音

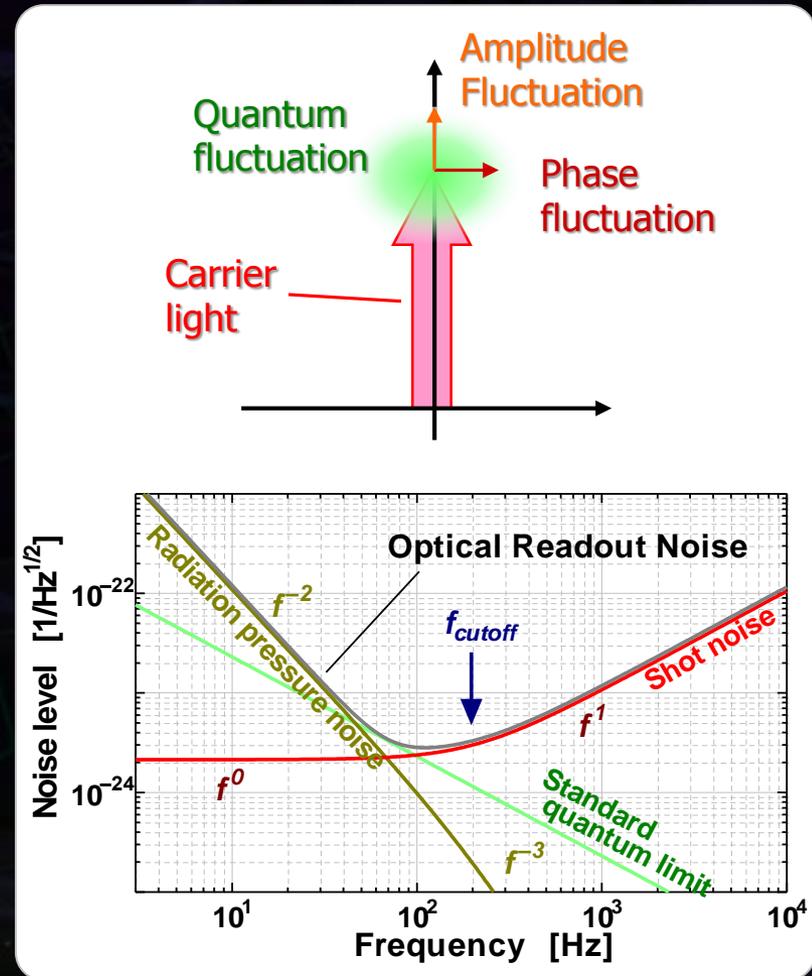
$$\delta h_{\text{rad}} \propto \sqrt{P}$$

⇩ 二乗和を最小にする光パワー

• 標準量子限界

- (SQL : Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} = \frac{1}{2\pi L f} \sqrt{\frac{8\hbar}{m}}$$



・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の機械損失

→ 揺動力 (揺動散逸定理)

熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

T : 温度 [K]
 Q : 機械損失の逆数

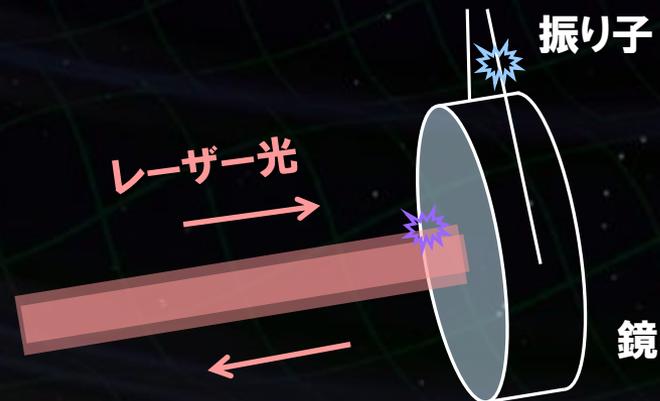
温度を下げる
良い材質を選ぶ
低減する干渉計構成

鏡の熱雑音

鏡基材, コーティング面の損失.

振り子の熱雑音

鏡の懸架ワイヤ等での損失.



・熱雑音 --- 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

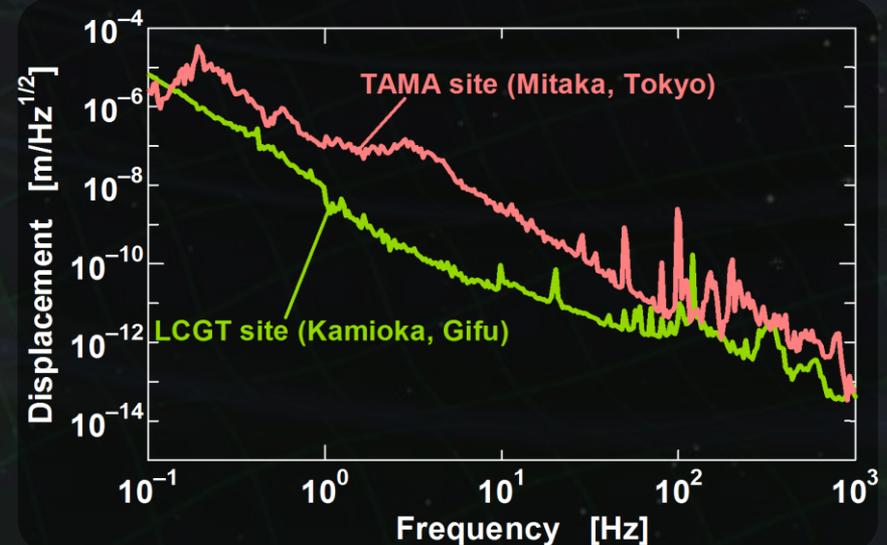
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

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.

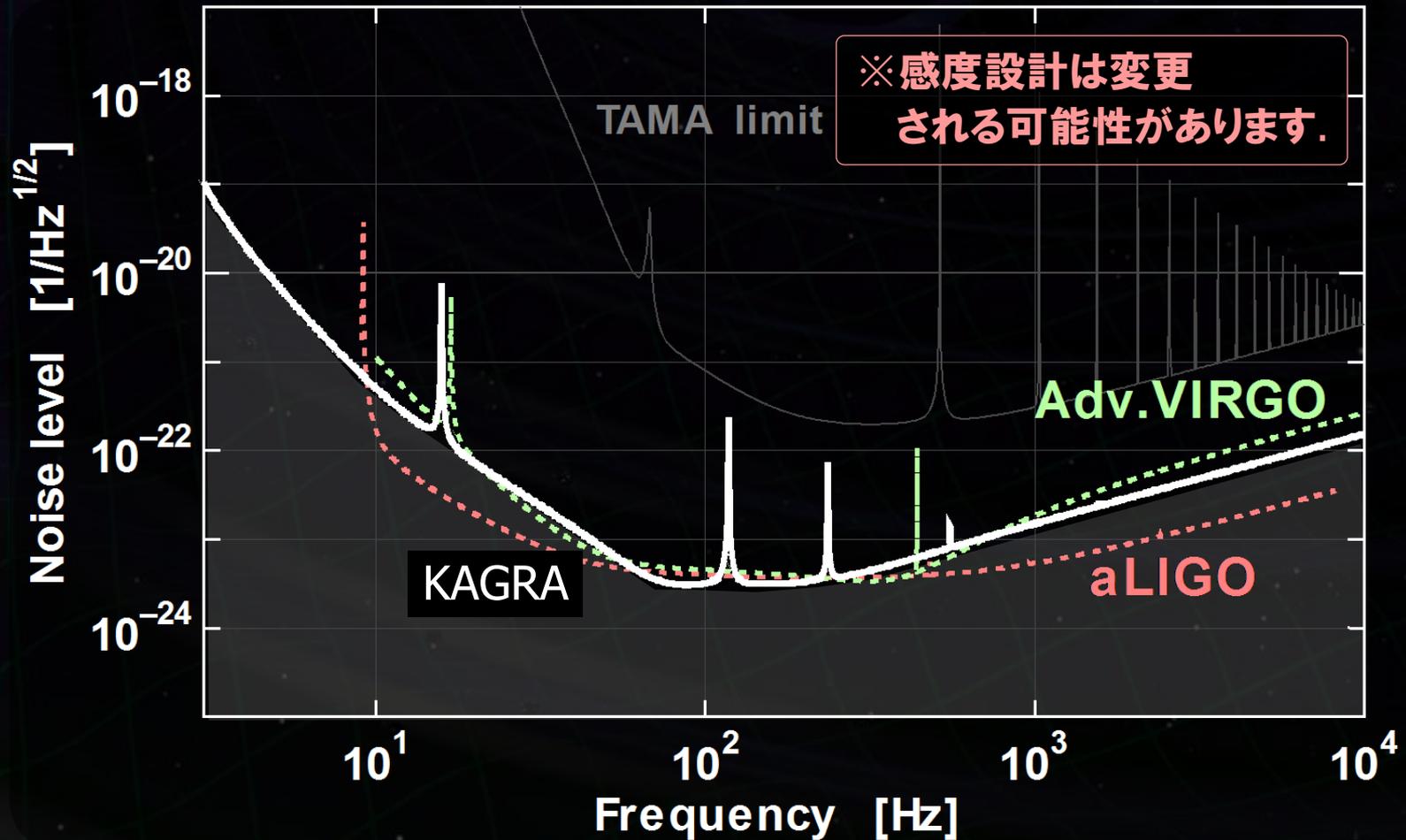
高性能防振装置 SAS : 多段・低周波の防振装置.

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



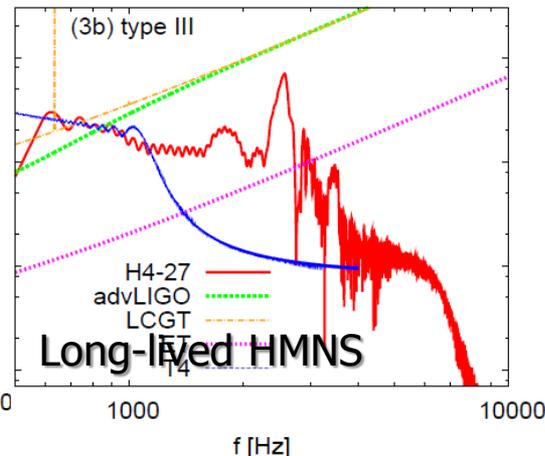
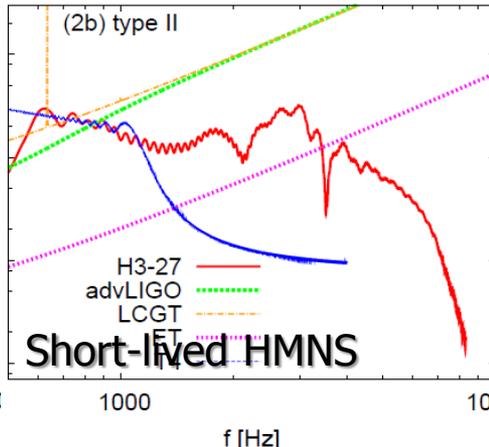
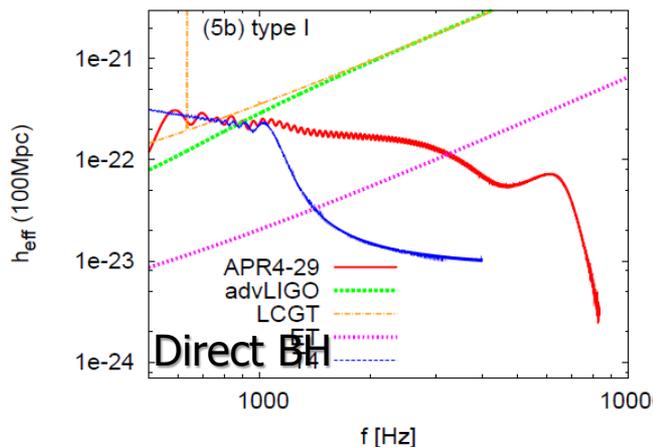
連星合体のスペクトル

距離100Mpc

APR4, Type I
1.45-1.45Msun

H3, Type II
1.35-1.35Msun

H4, Type III
1.35-1.35Msun



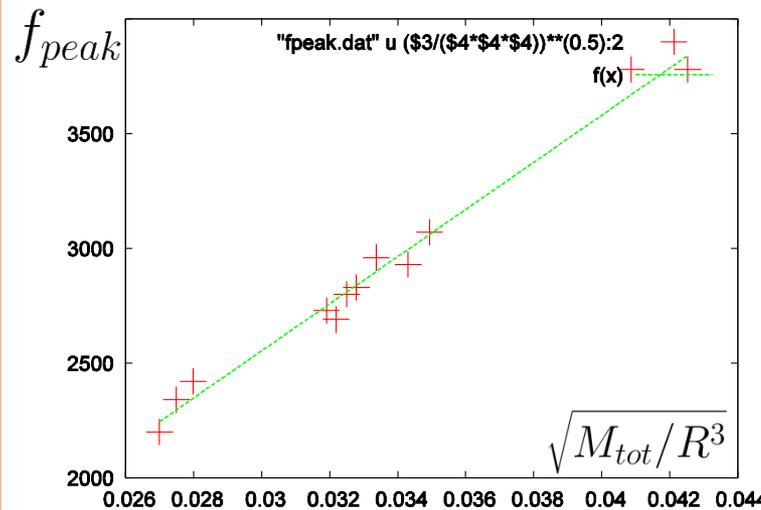
HMNSの回転周波数にピーク
→ 中性子星の半径と相関



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 $2 \sim 15\rho_0$)

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)

密度-圧力

中性子星の半径-質量

Lattimer+ (2010)

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

長ガンマ線バースト

短ガンマ線バースト

超新星爆発

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

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