

重力波天文学



Illustration: Sora

スプリングスクール@東京大学宇宙線研究所
H29. 3. 7 川村静児(東京大学宇宙線研究所)

アインシュタイン方程式

アインシュタイン・テンソル

エネルギー・運動量・テンソル

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

非線形方程式

波動解

ミンコフスキー時空からのわずかなずれ

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

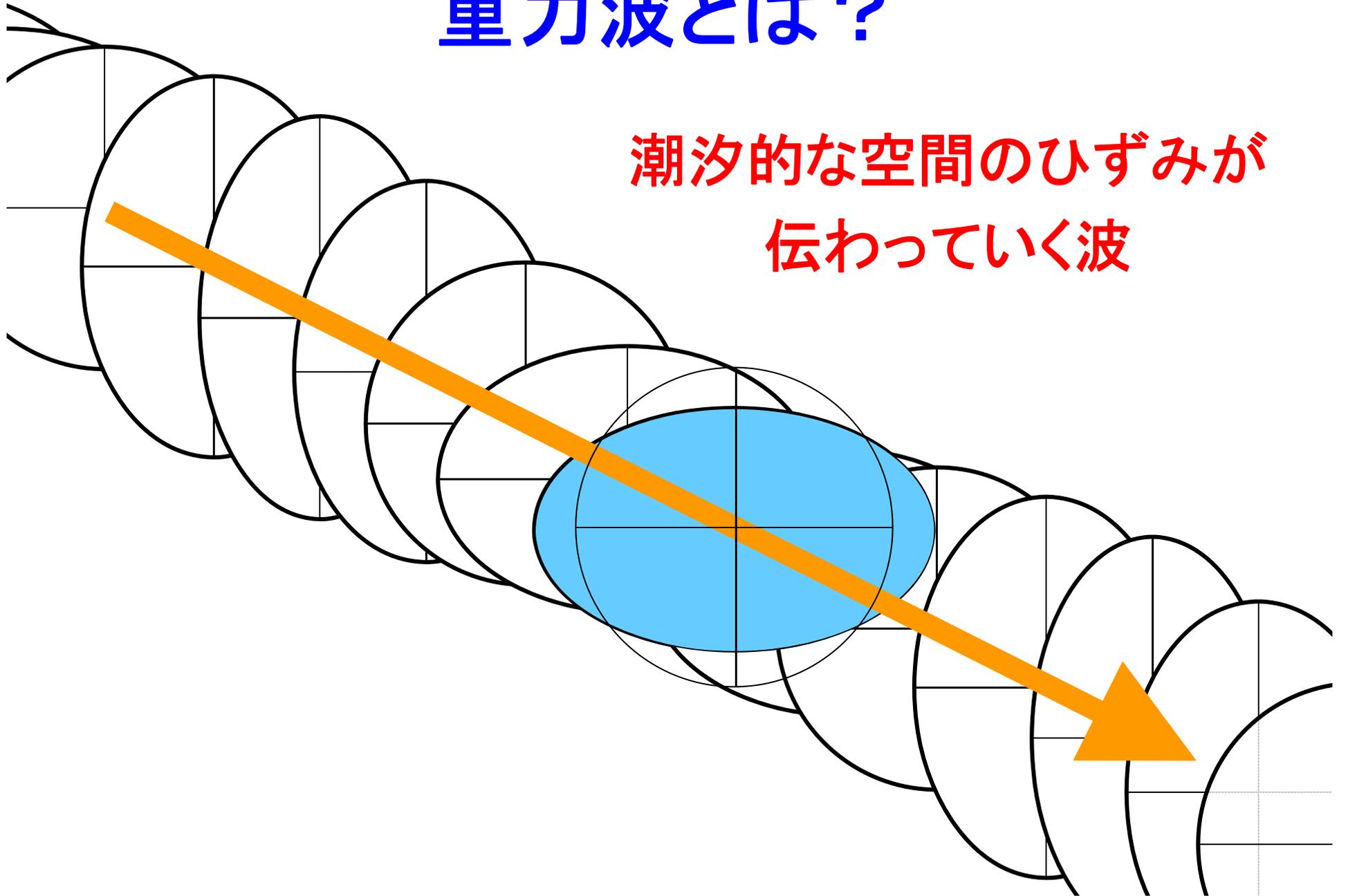
$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$

波動解

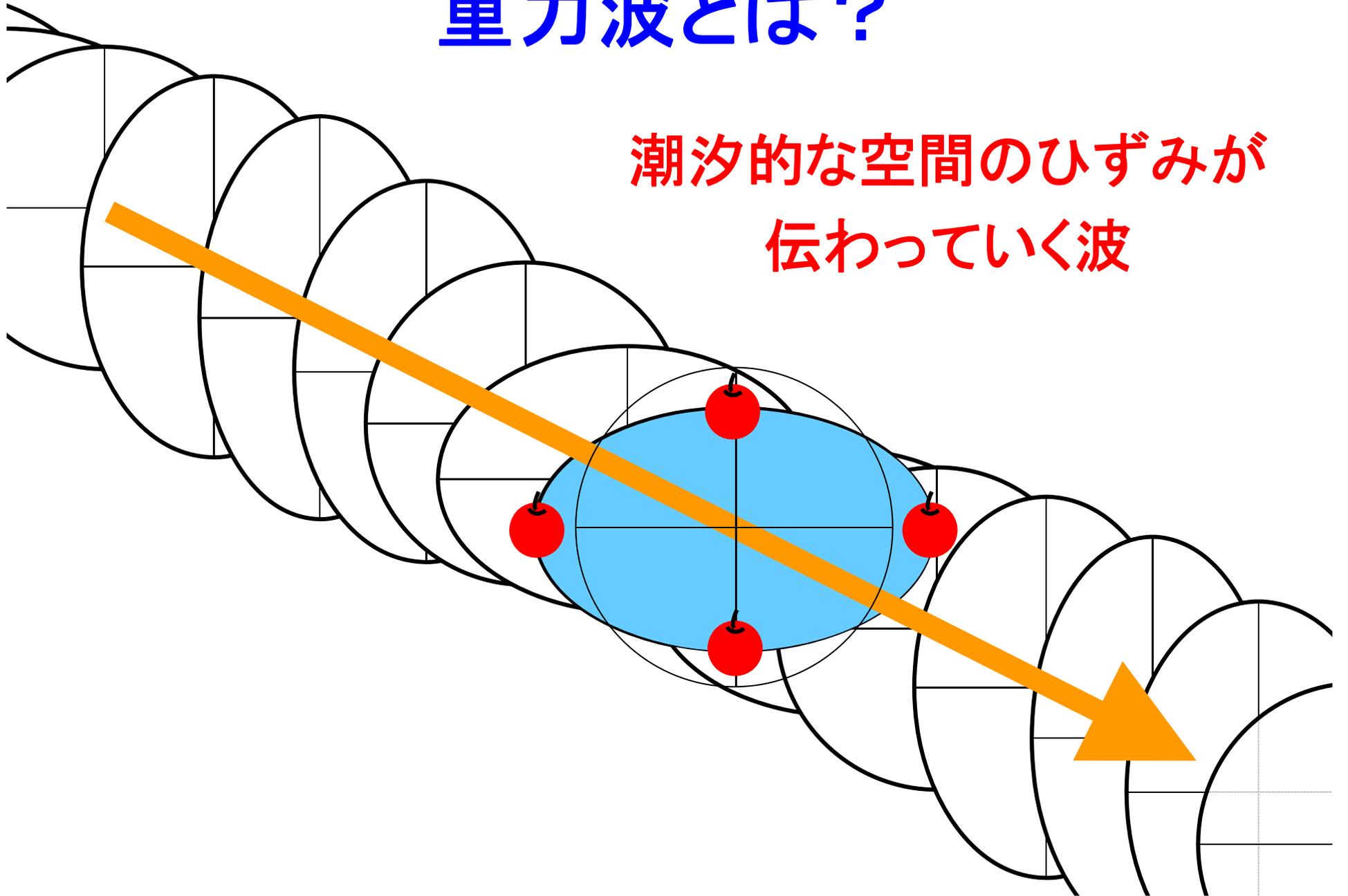
重力波とは？

潮汐的な空間のひずみが
伝わっていく波

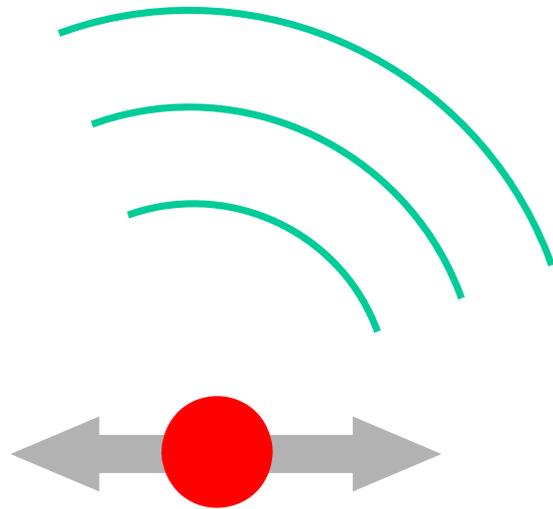


重力波とは？

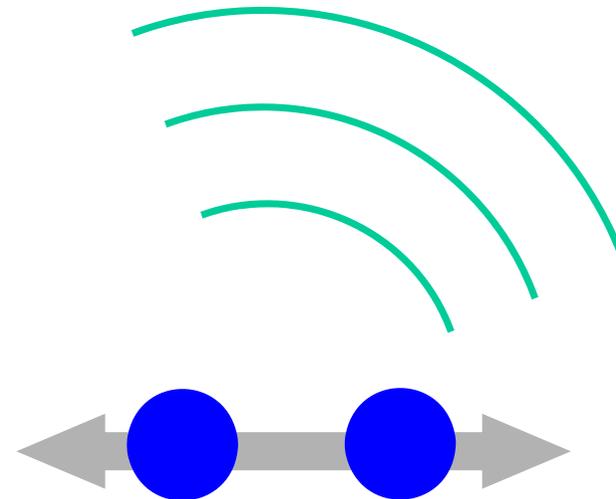
潮汐的な空間のひずみが
伝わっていく波



重力波の発生



電荷(双極子放射)



質量(四重極子放射)

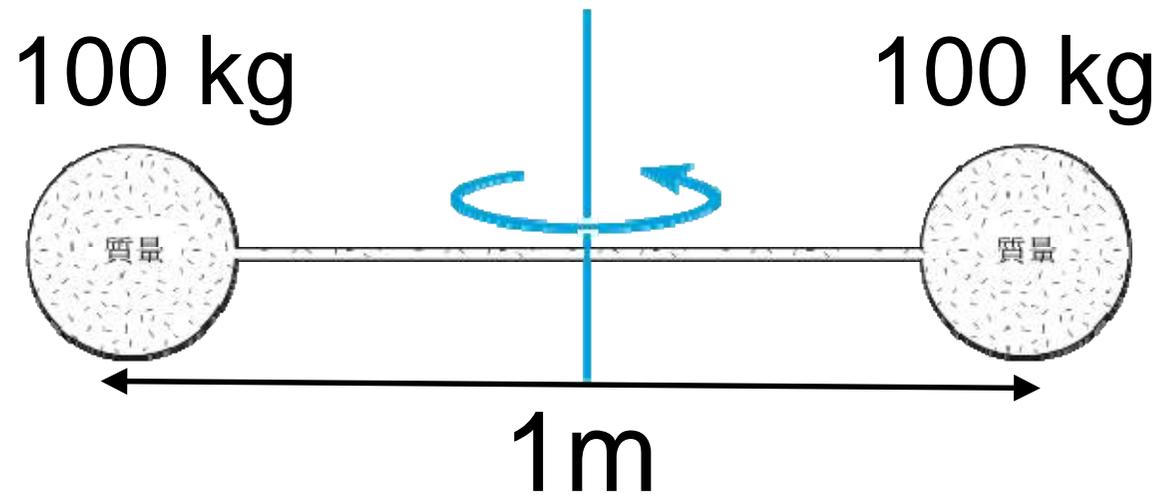
重力波の生成

$$h_{\mu\nu} = \frac{2G}{Rc^4} \ddot{I}_{\mu\nu}$$

四重極モーメント

$$I_{\mu\nu} = \int dV (x_\mu x_\nu - \frac{1}{3} \delta_{\mu\nu} r^2) \rho(\vec{r})$$

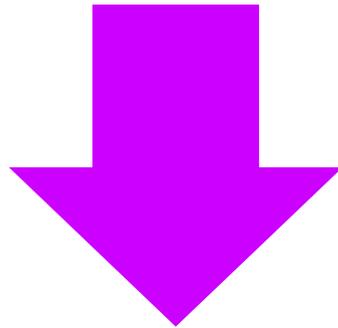
人工的に重力波を生成



$$h \sim 10^{-40} \text{ @ } 100 \text{ km}$$

1000回転/sec
(重力波: 2kHz)

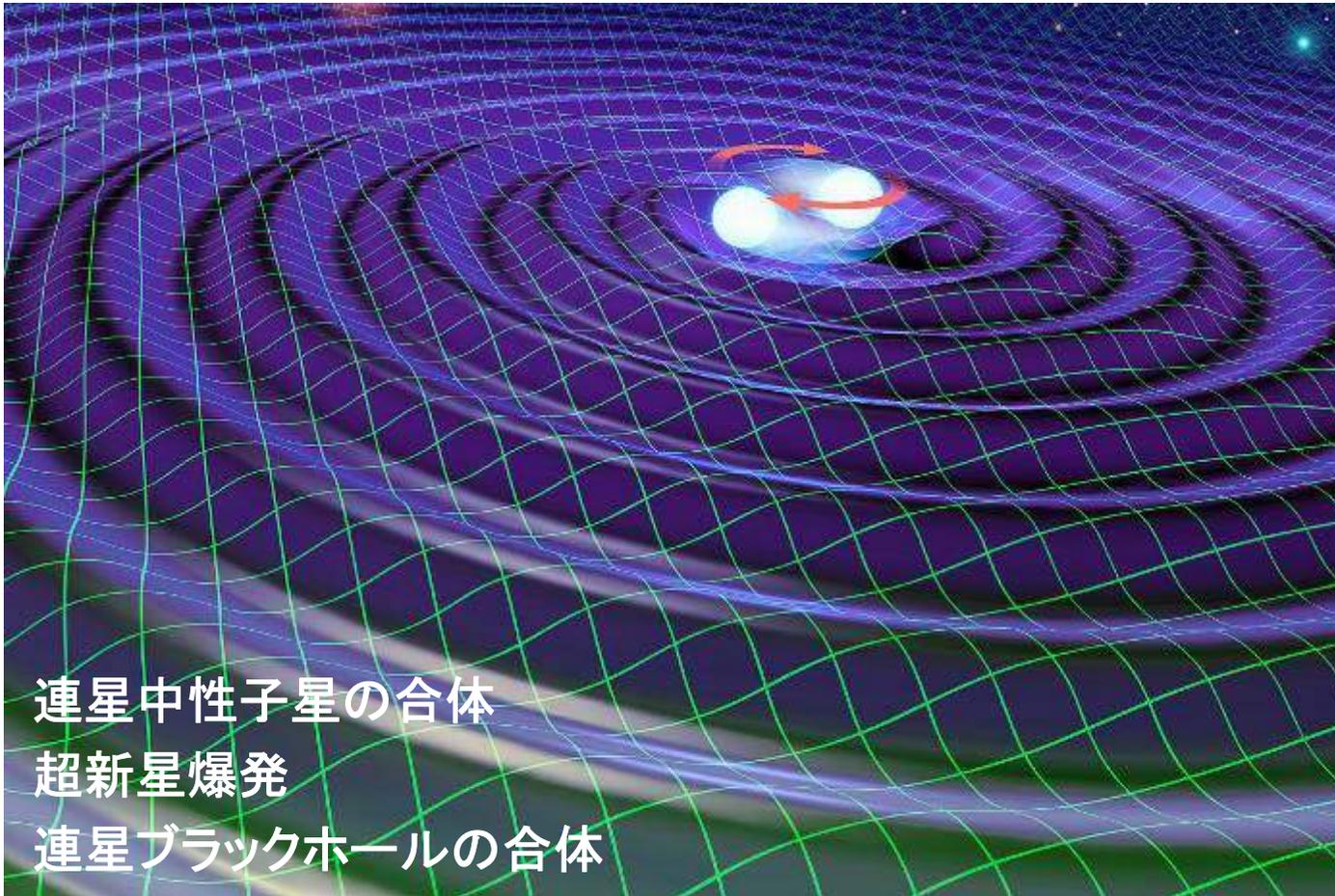
**重いものが速く動くほど
重力波がいっぱい出る！**



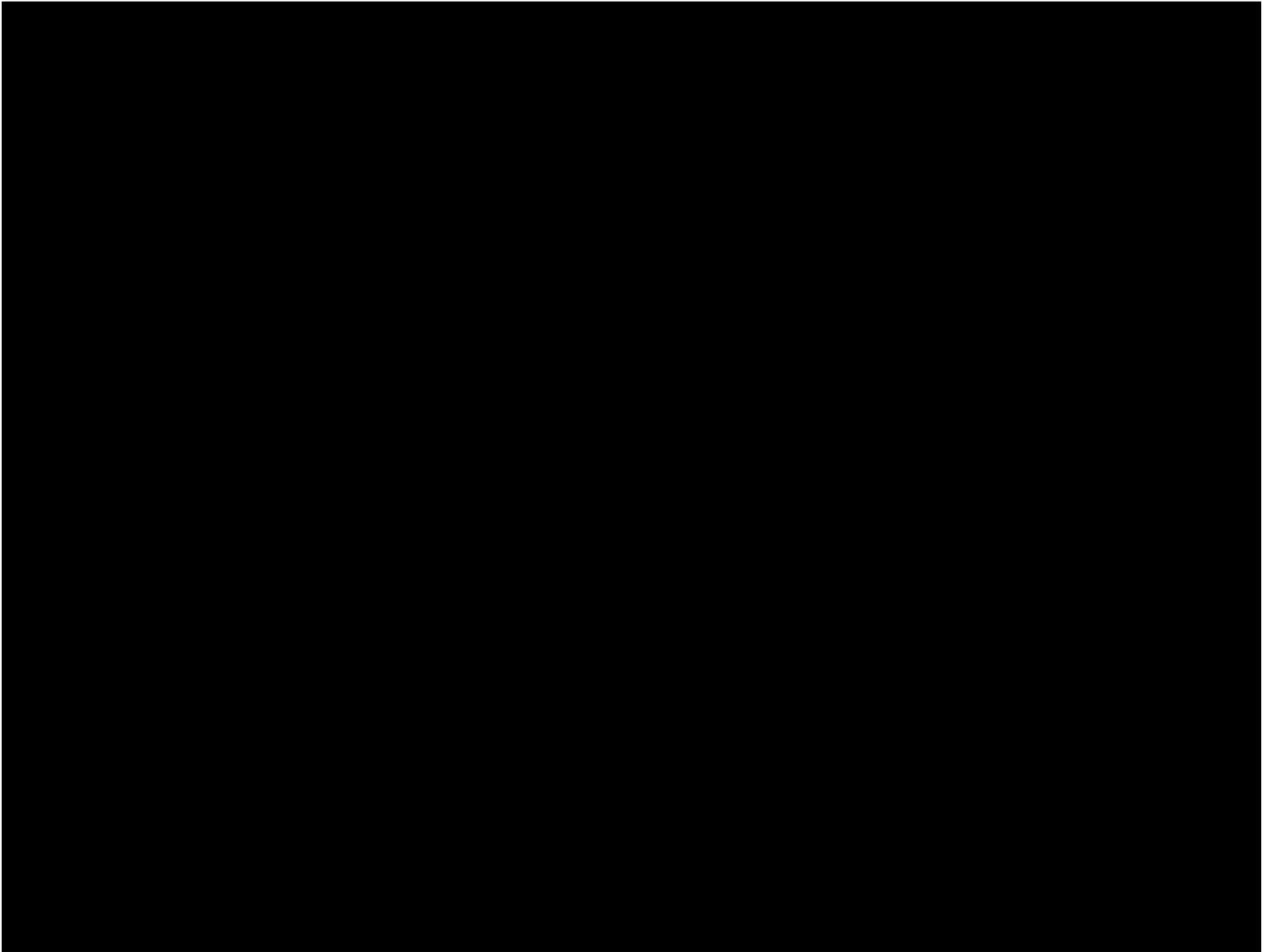
~~人工的~~

天体現象

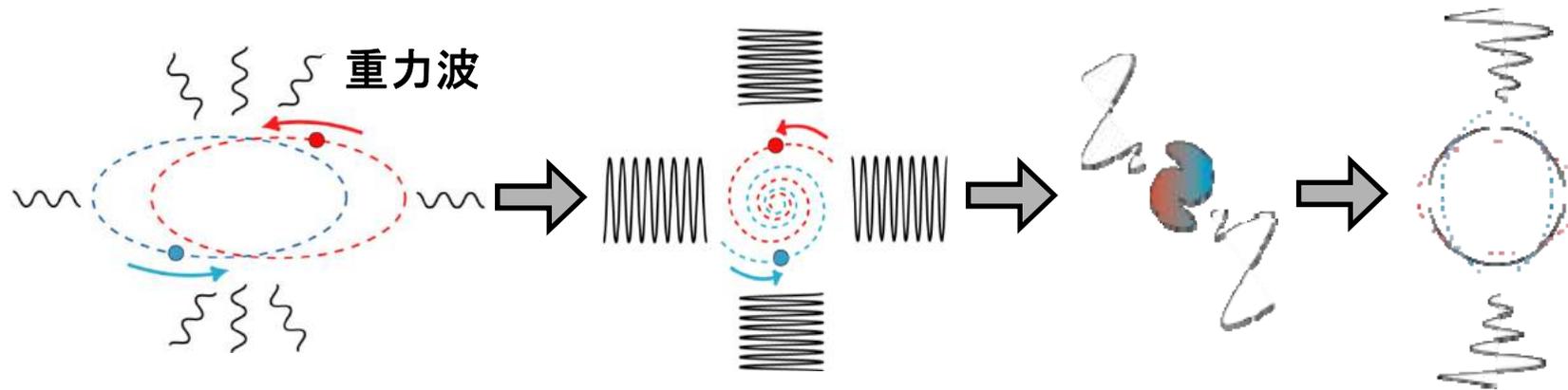
重力波のイメージ



CG/KAGAYA



中性子星連星の合体

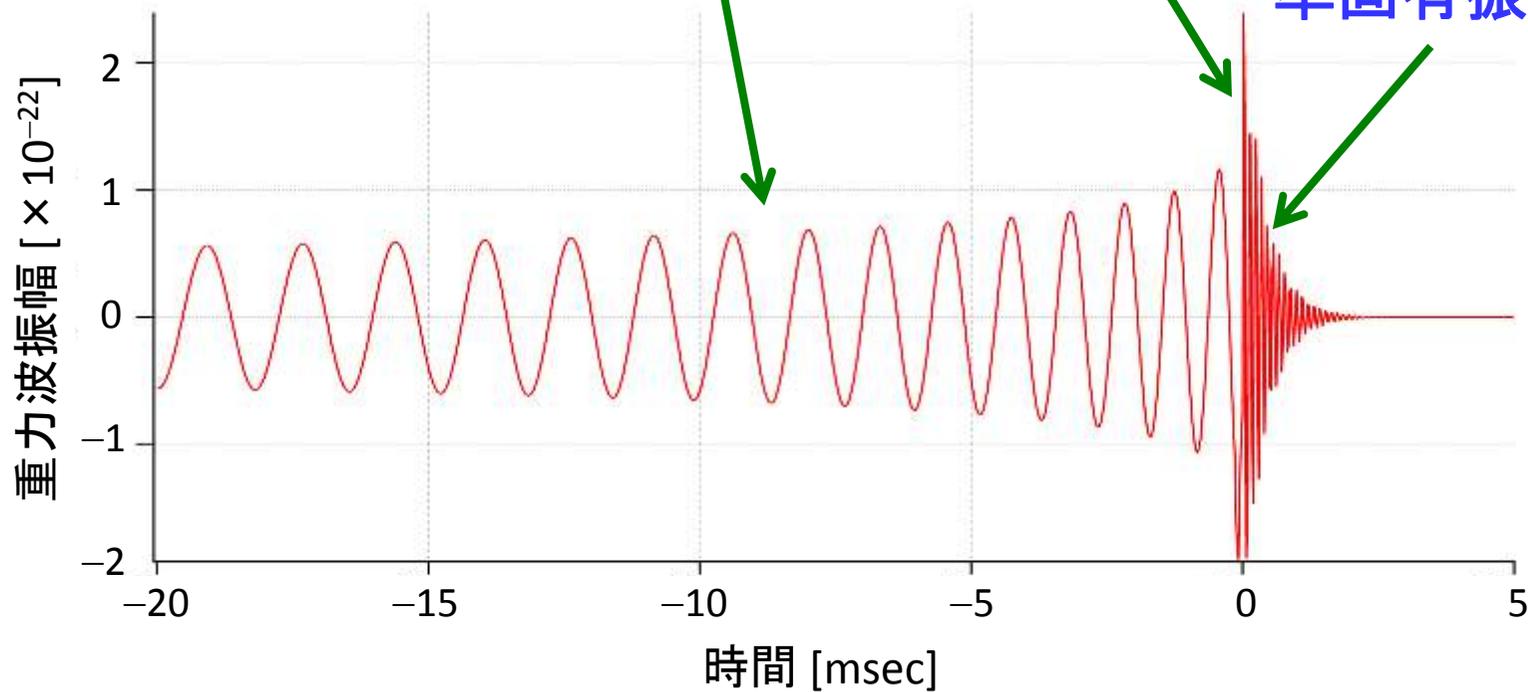


公転運動

インスパイラル

合体

ブラックホールの
準固有振動



重力波の存在の間接的証明

- テイラー、ハルスの連星パルサー (PSR1913+16) の観測
- 重力波を放出してエネルギーを失い、軌道周期が変化
- 1993年ノーベル賞

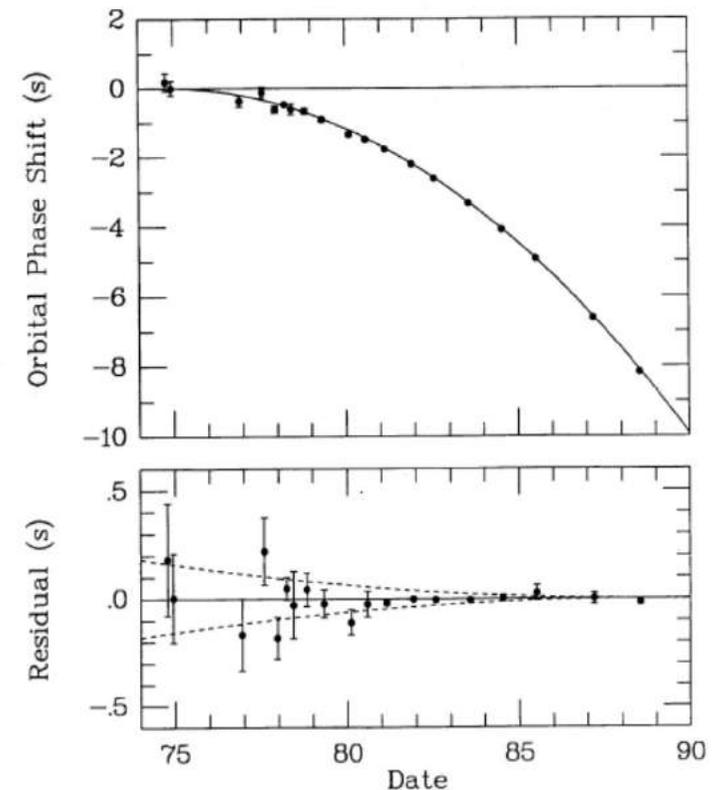
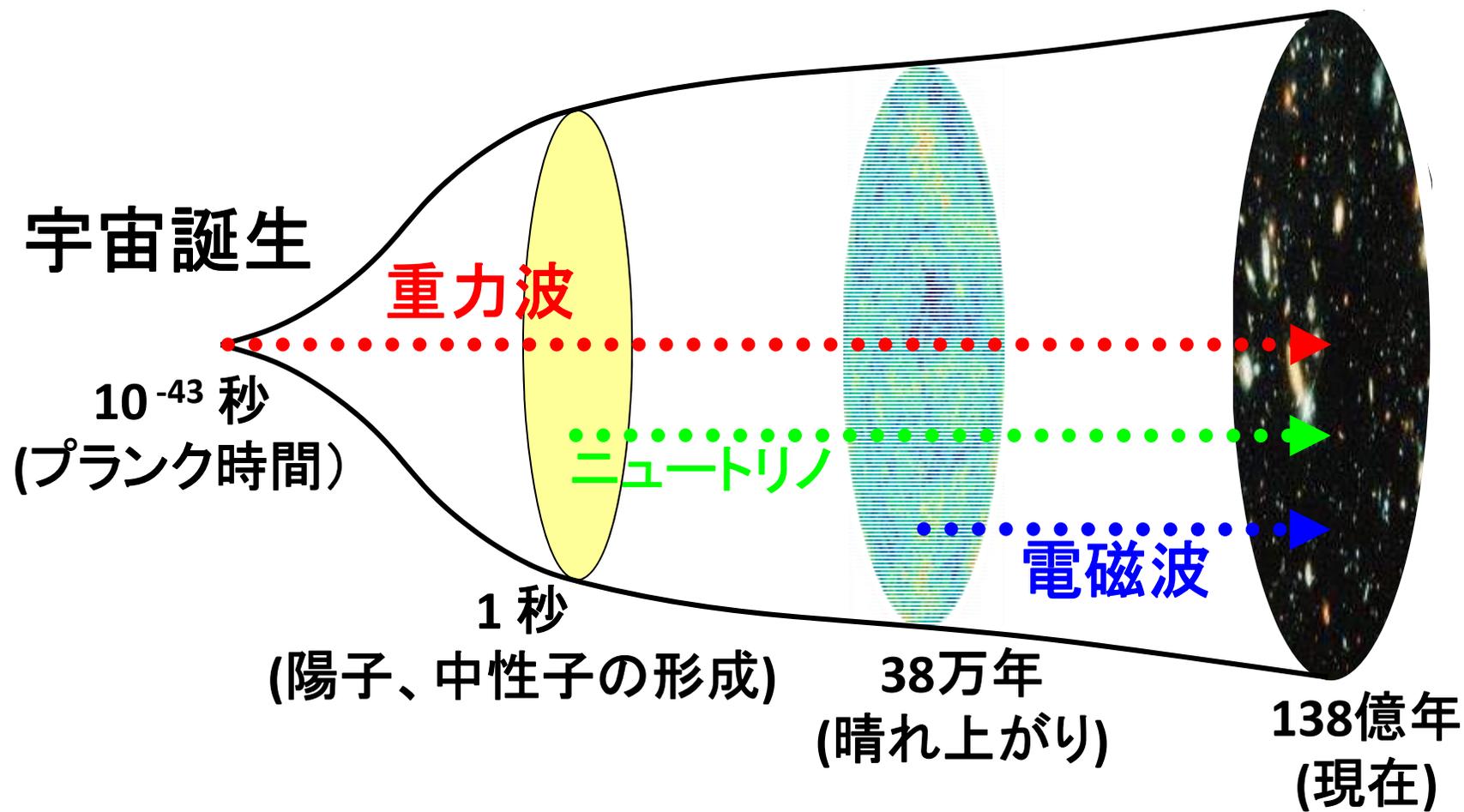


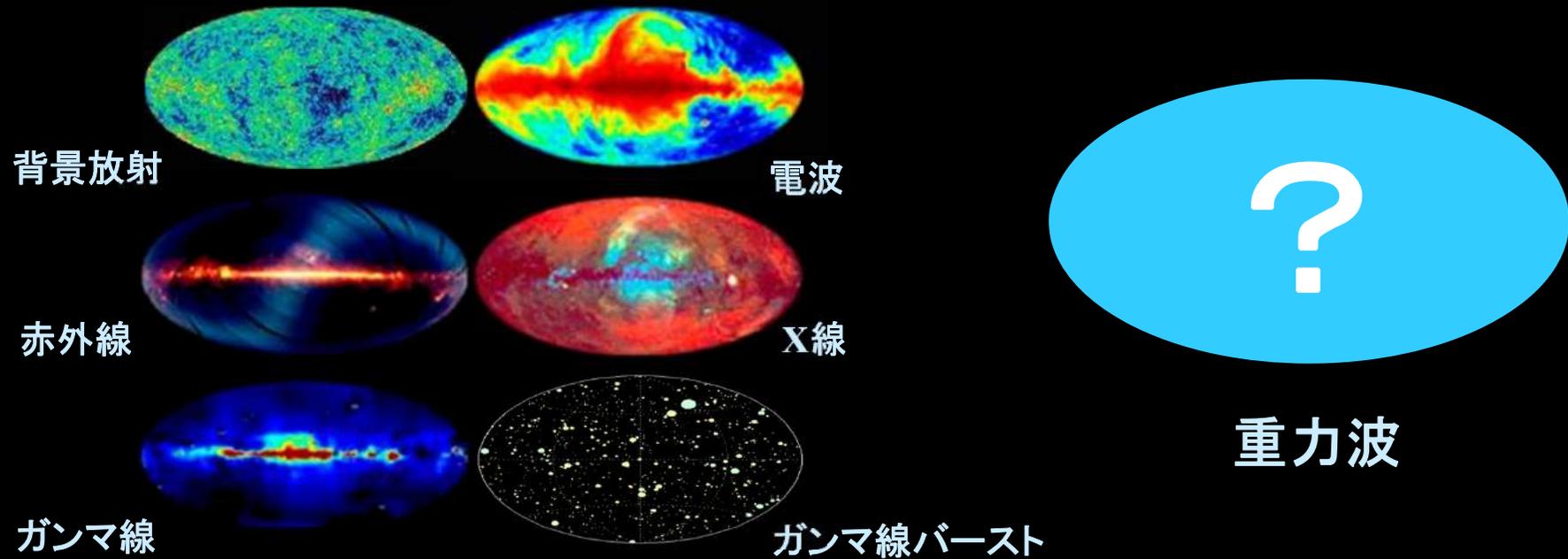
FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves illustrate differential trends that would be expected (relative to epoch 1988.54) if the rate of orbital decay \dot{P}_b were 2% larger or 2% smaller.

Taylor et al., ApJ.345(1989) p435

重力波で宇宙の始まりを観る！



重力波天文学

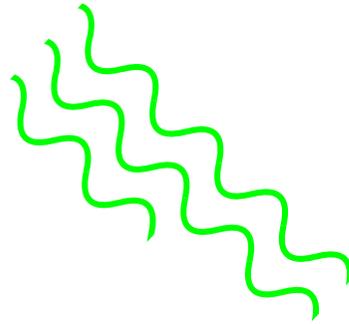


重力波によって想像を絶するような、新しい天体が見つかることも期待できる

余剰次元



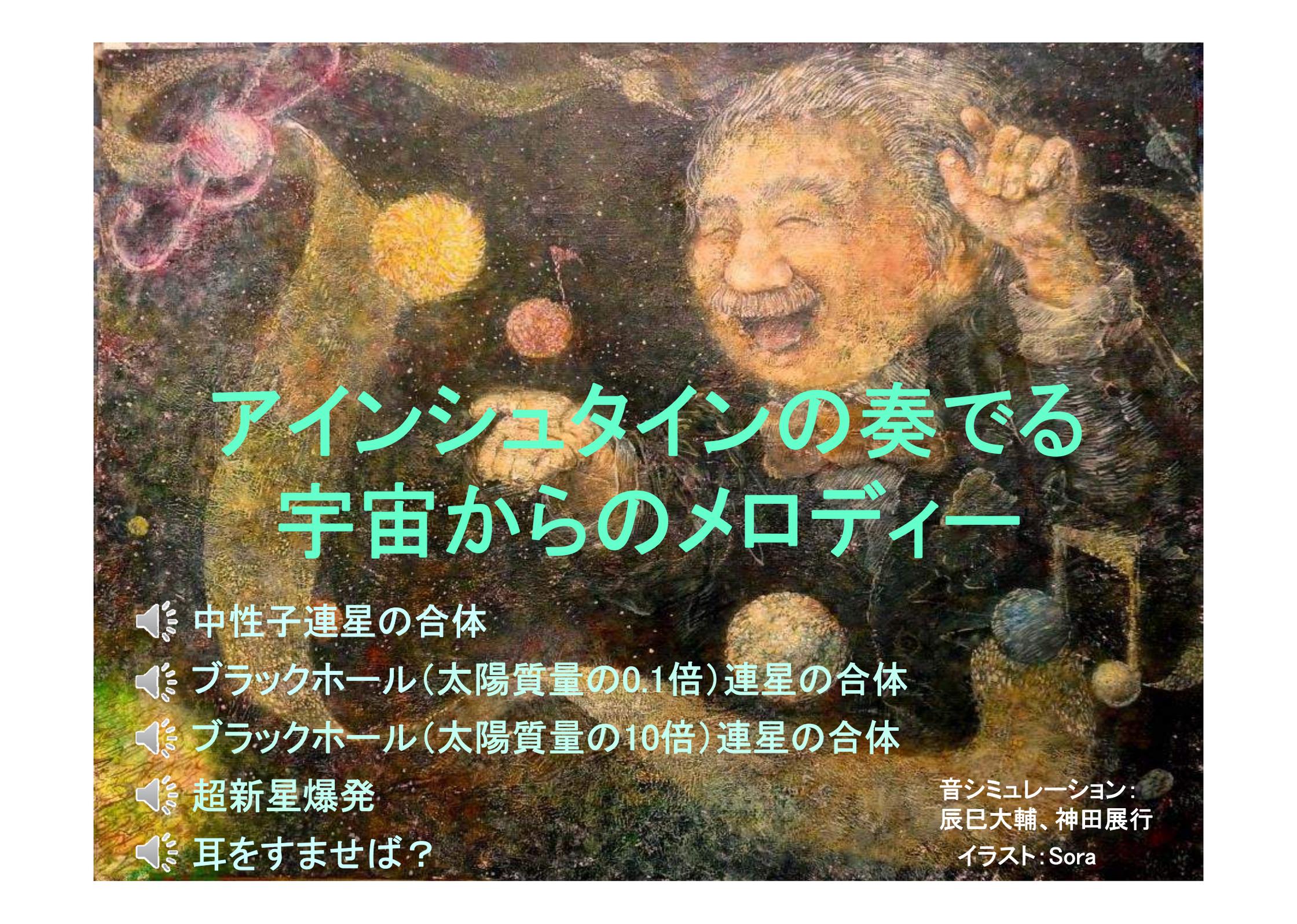
何か小さいな？



余剰次元にしみ出す？

超ひも理論により予言される
余剰次元の存在の検証？



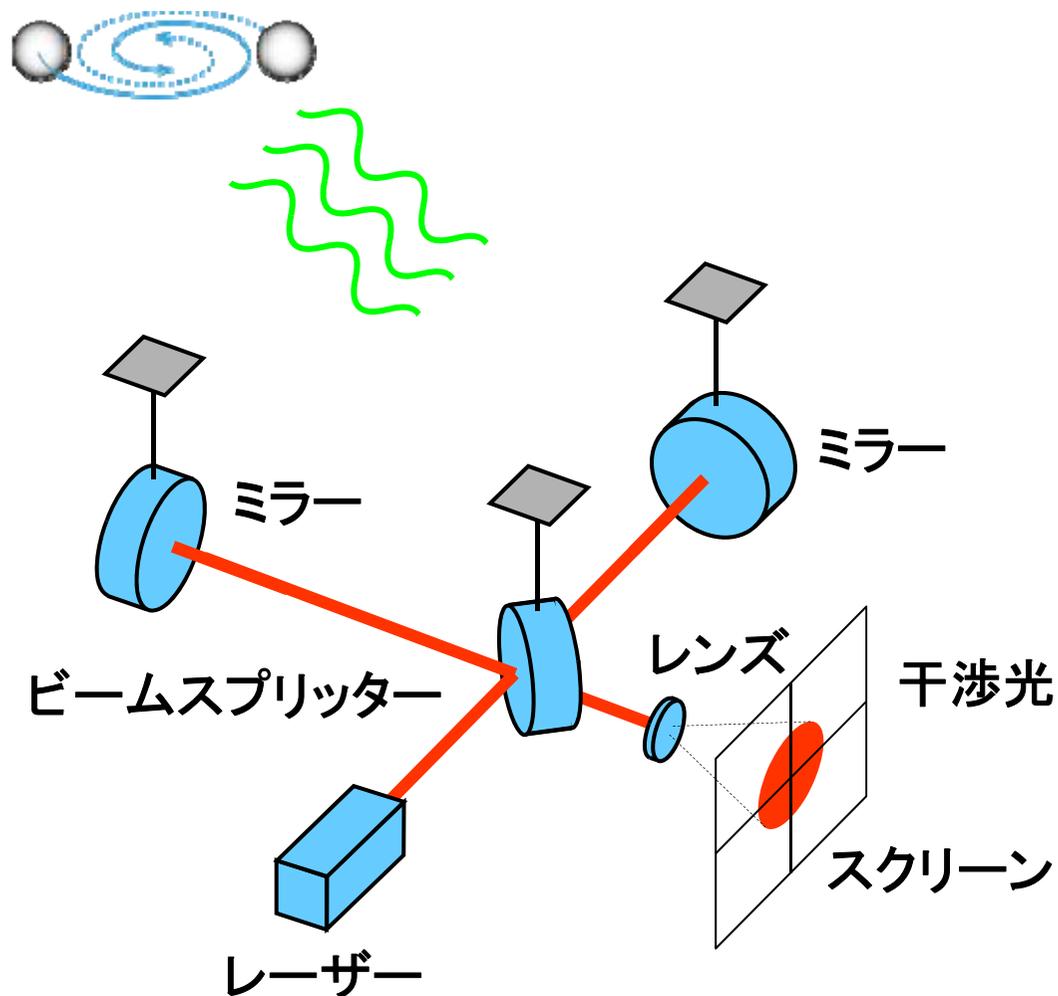


アインシュタインの奏でる 宇宙からのメロディー

- 🔊 中性子連星の合体
- 🔊 ブラックホール(太陽質量の0.1倍)連星の合体
- 🔊 ブラックホール(太陽質量の10倍)連星の合体
- 🔊 超新星爆発
- 🔊 耳をすませば？

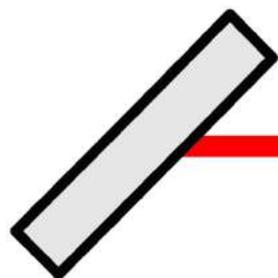
音シミュレーション:
辰巳大輔、神田展行
イラスト: Sora

レーザー干渉計による 重力波検出の原理



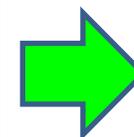
本当に測れるのか？

ビームスプリッター



光の速度が速くなる

ミラー



伸びる

キャンセルして測れないのでは？？？

測れます！

(1) 局所慣性系

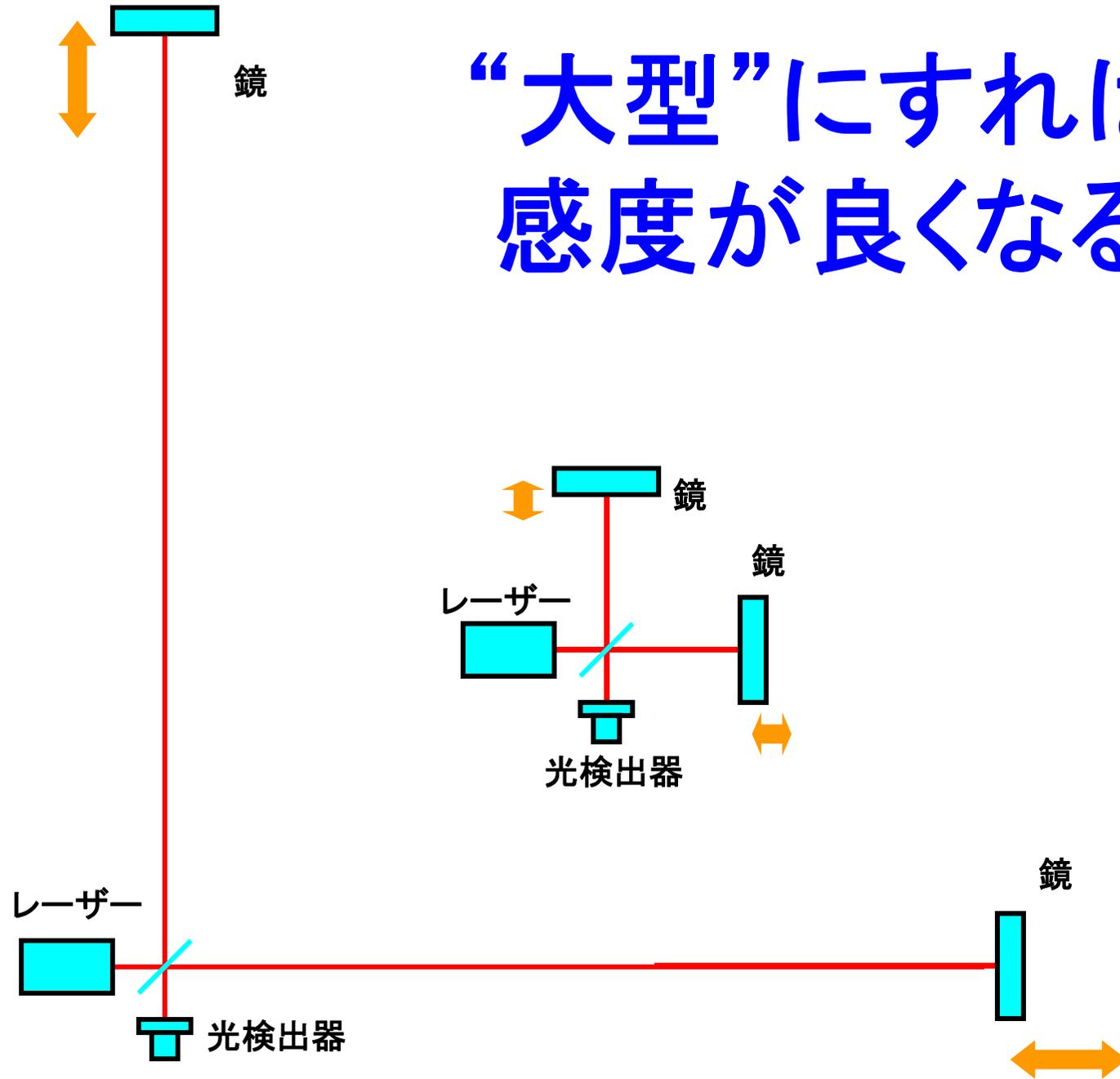


(2) Transverse Traceless座標系



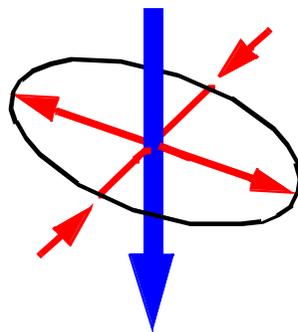
いずれの座標系においても光の伝播時間は変化する！

“大型”にすれば
感度が良くなる

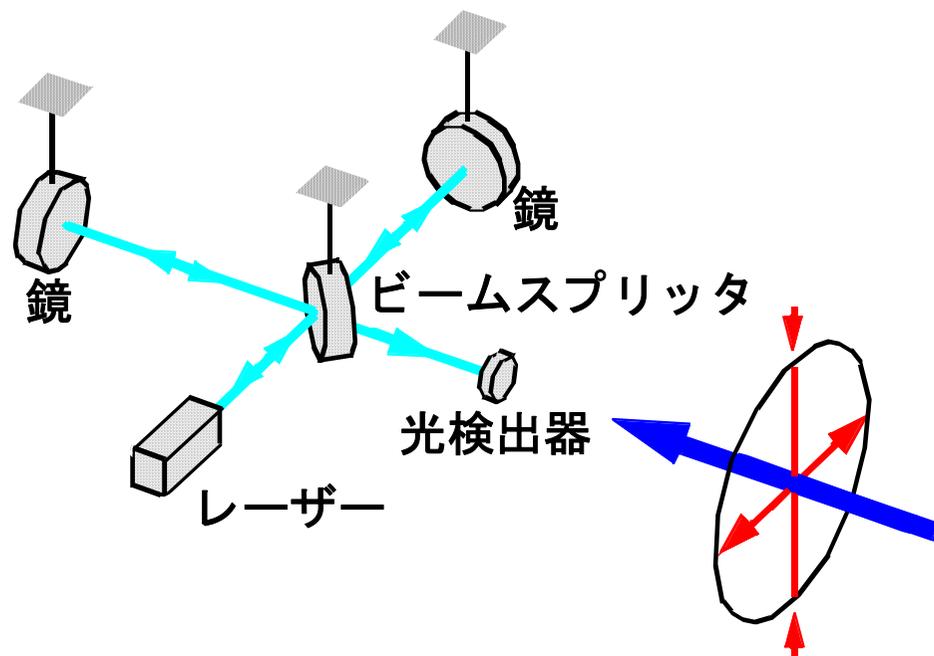
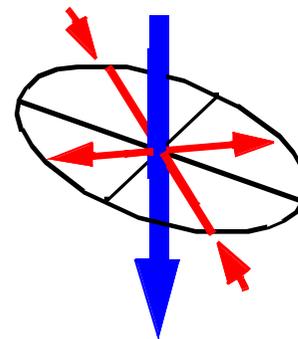


干渉計の指向性

応答: 最高



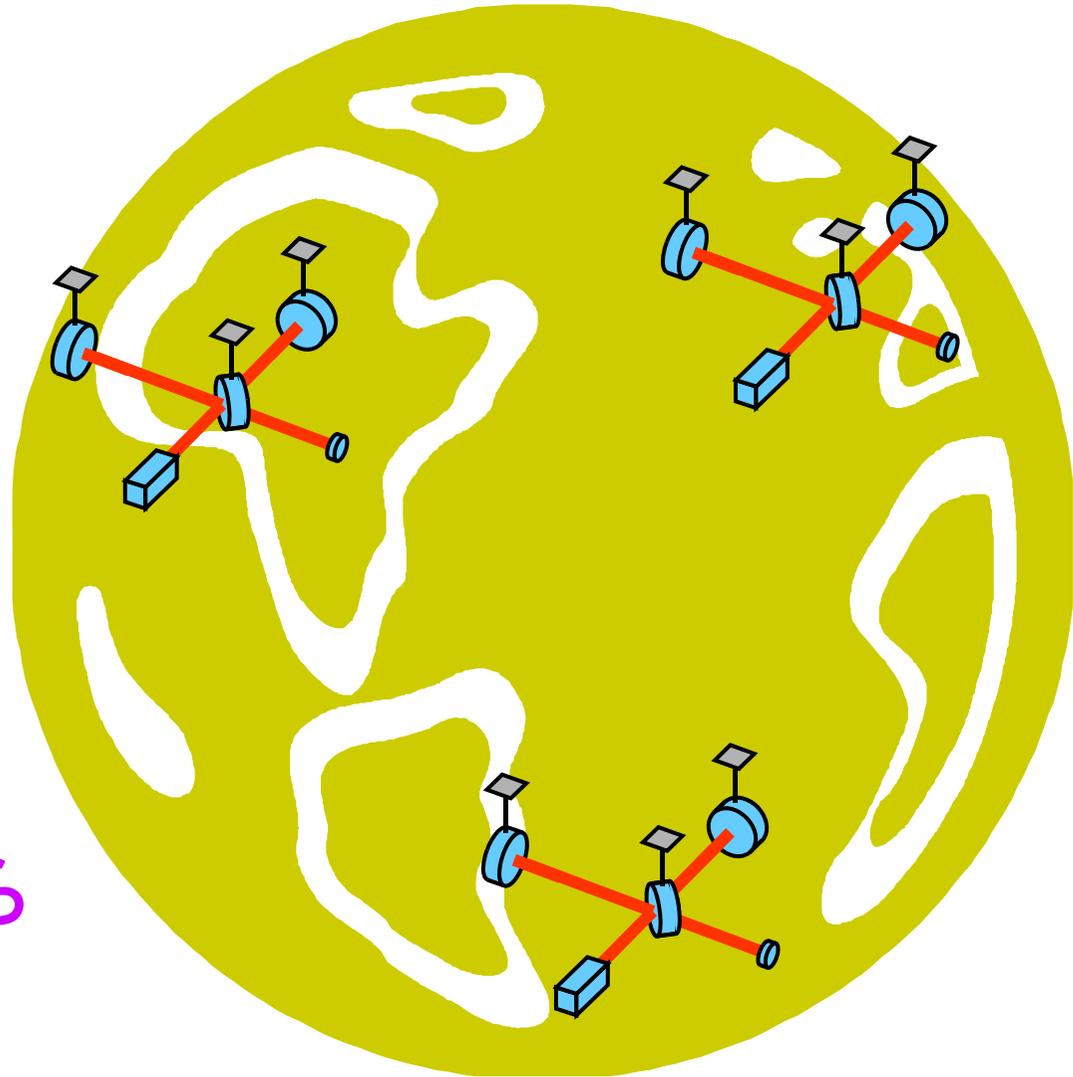
応答: ゼロ



応答: 最高の半分

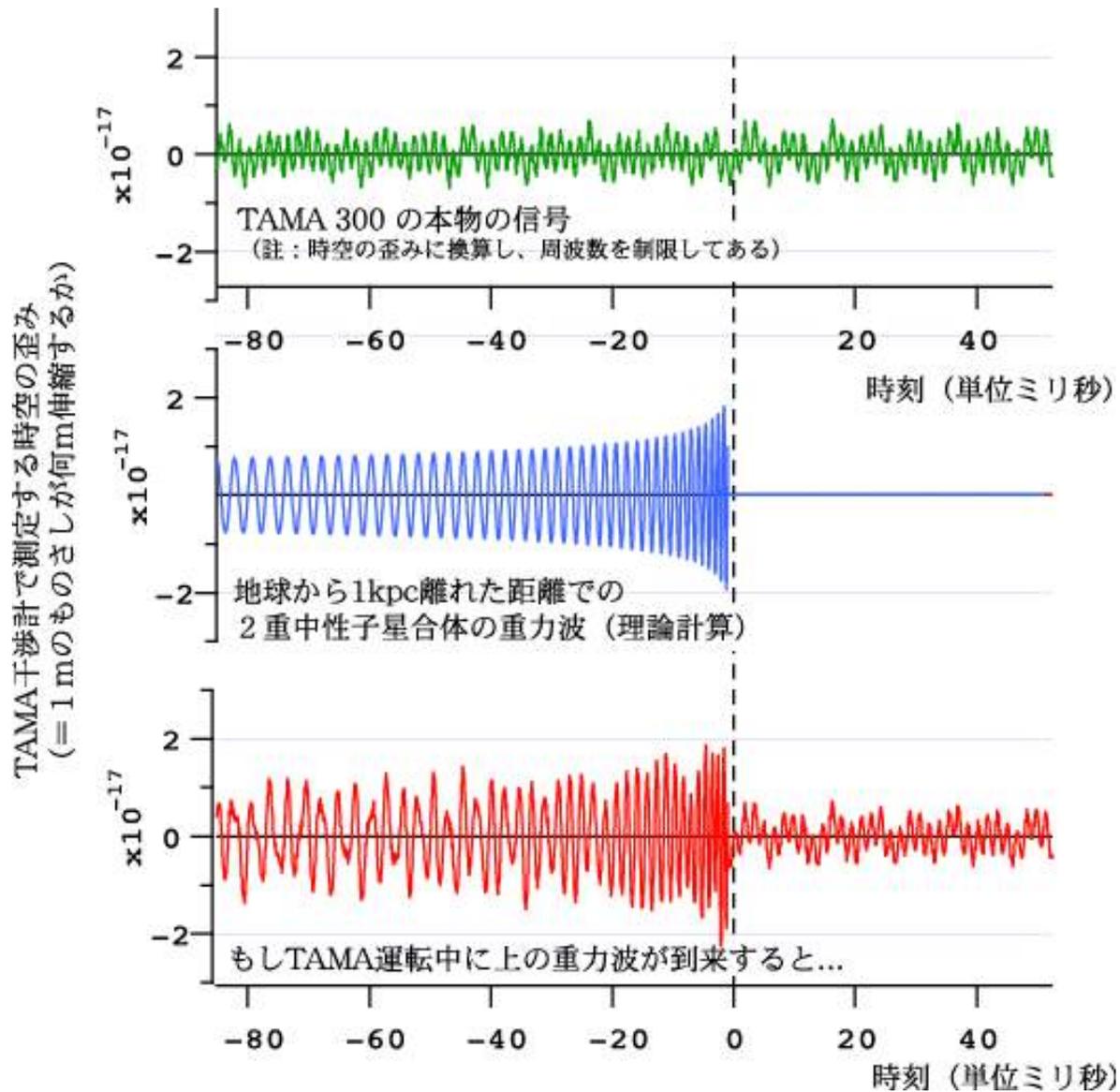
重力波の方向や偏極によって応答が違う

重力波源の方向は？

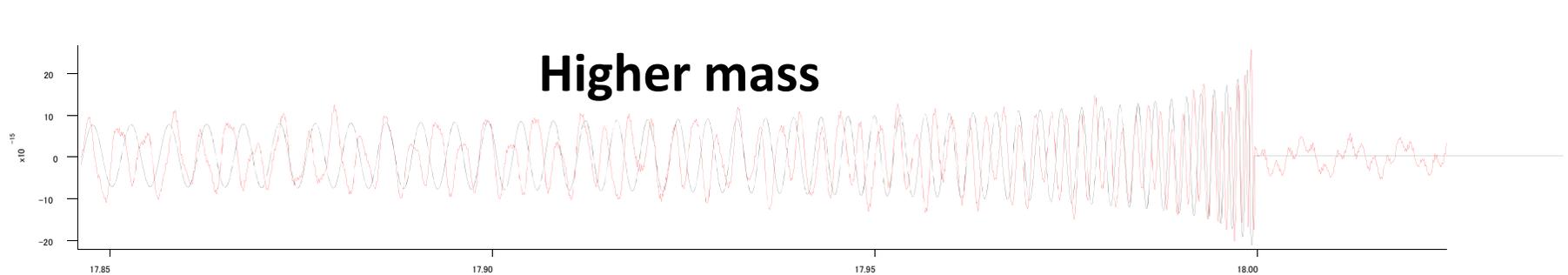
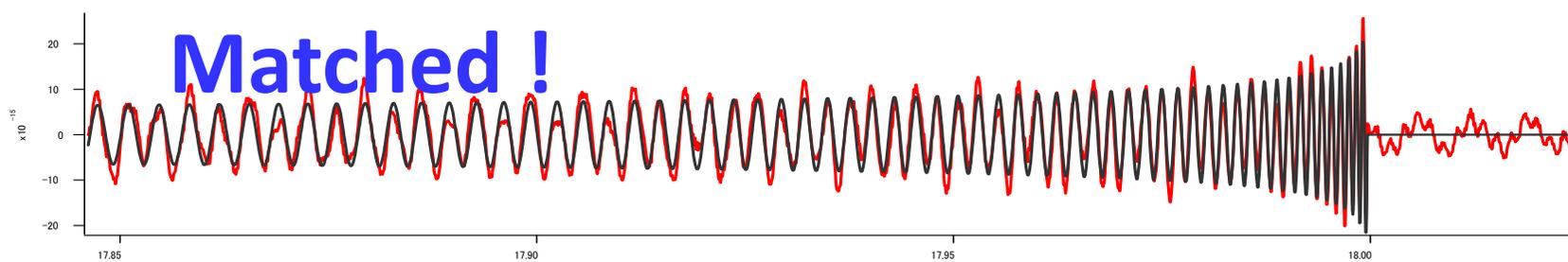
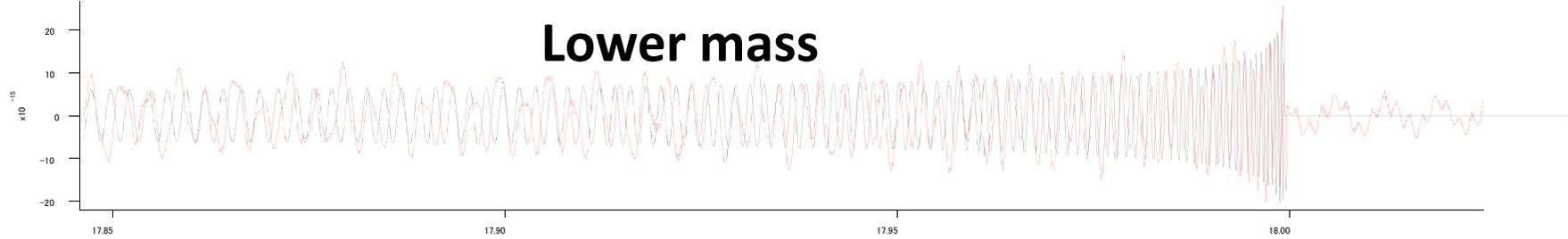
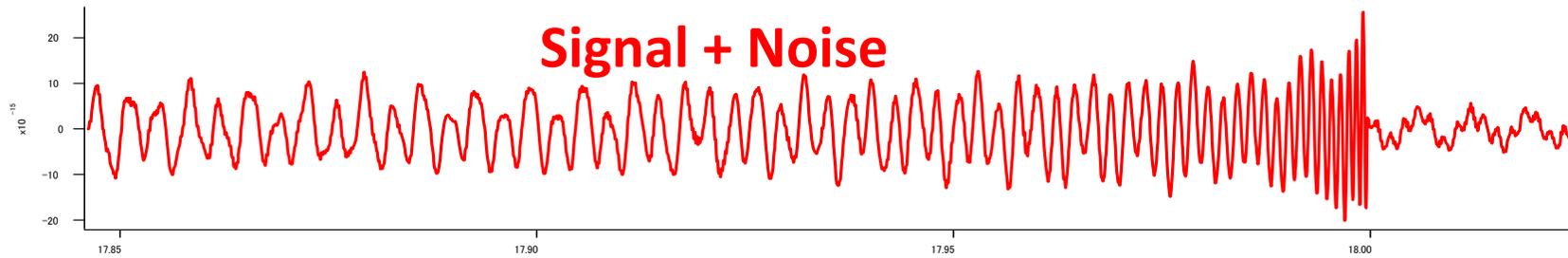


信号の時間差から
方向が分かる！

干渉計の雑音+重力波信号

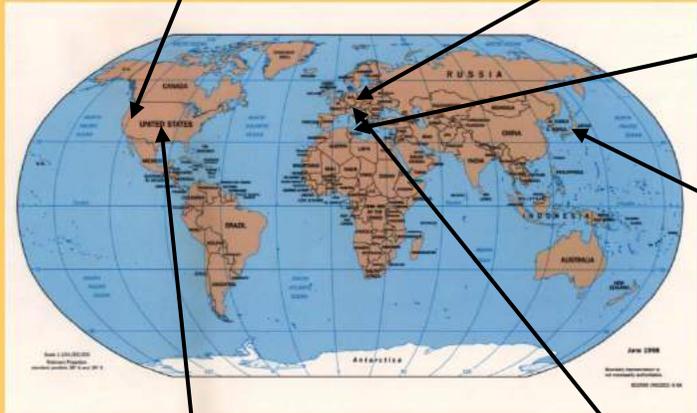


Matched filter



世界の重力波検出器

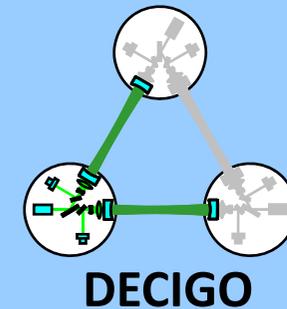
地上 第3世代検出器



地上 第3世代検出器



宇宙 検出器





LIGO

アーム長: 4 km

Hanford, Washington



Livingston, Louisiana



重力波初検出！



RT RUPTLY

重力波初検出！

ブラックホール連星の合体

13億光年遠方

太陽質量の29倍

太陽質量の36倍

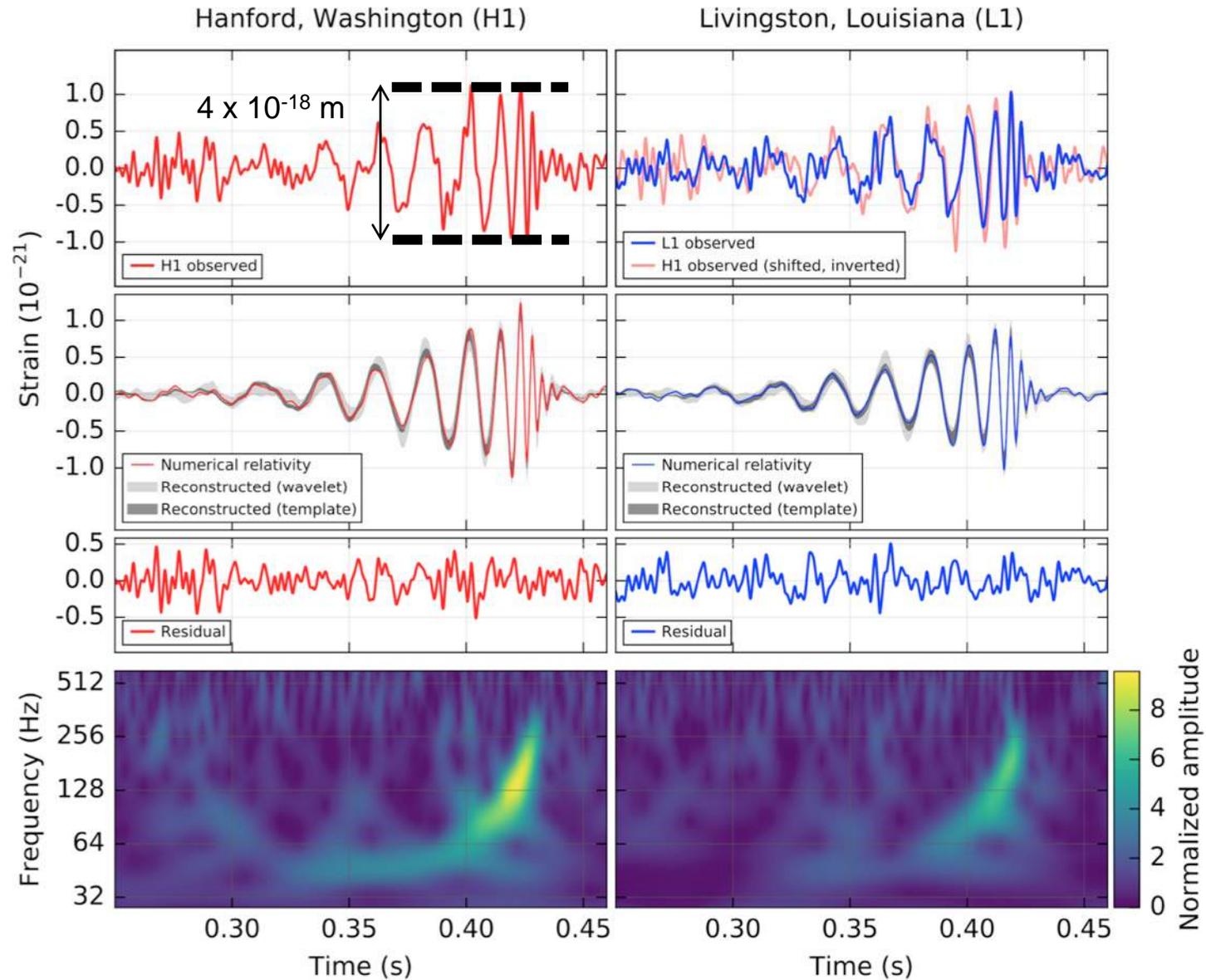
合体後のブラックホール：太陽質量の62倍

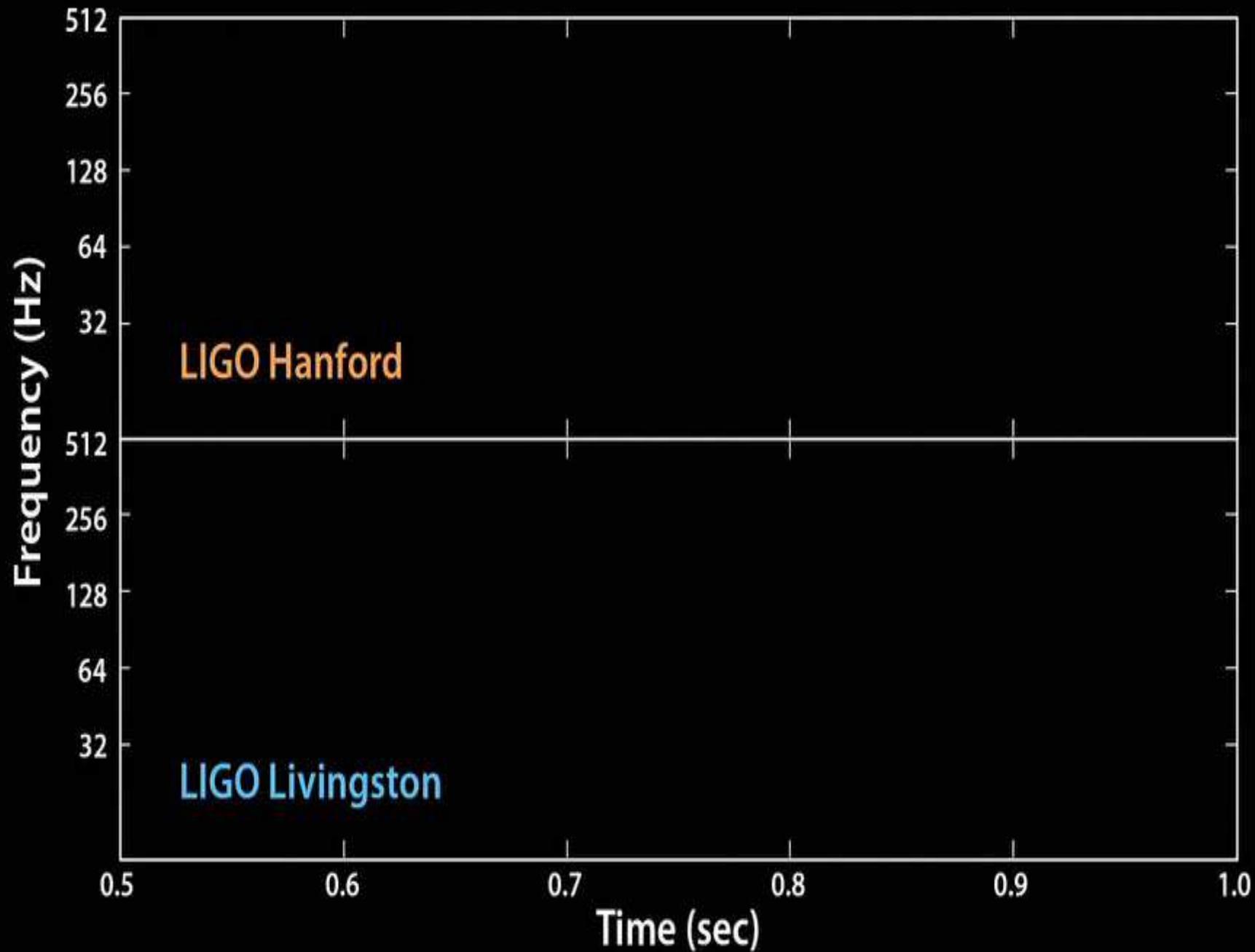
⇒ 太陽3個分の質量が重力波エネルギーとして放出 SXS

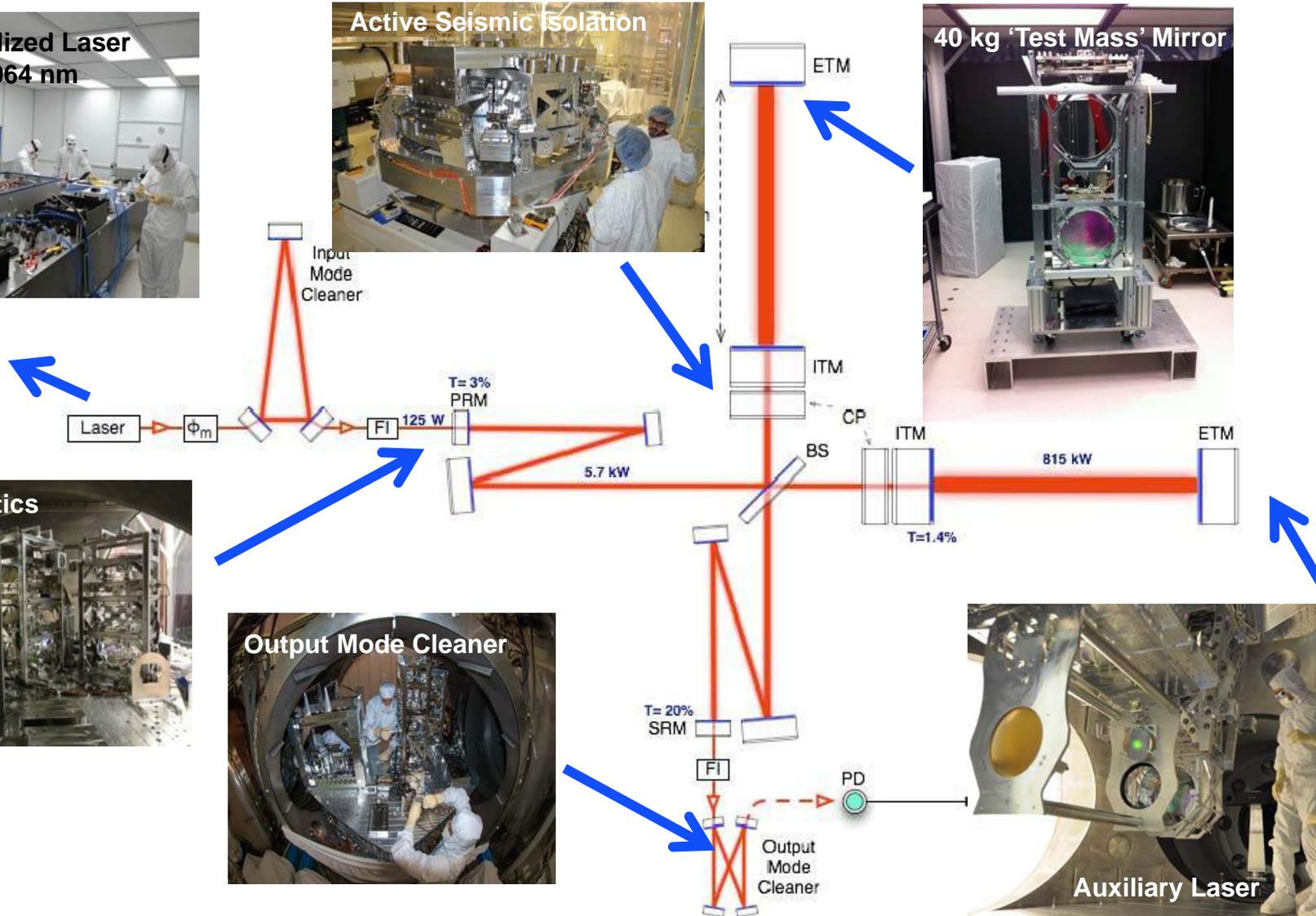
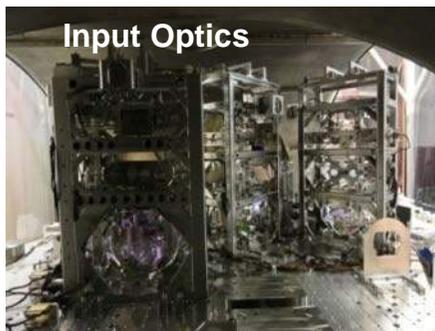
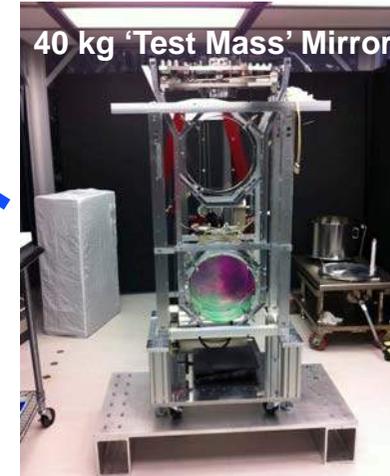




Abbott, et al. ,LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration,
"Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger" [Phys. Rev. Lett. 116, 061102 \(2016\)](#)

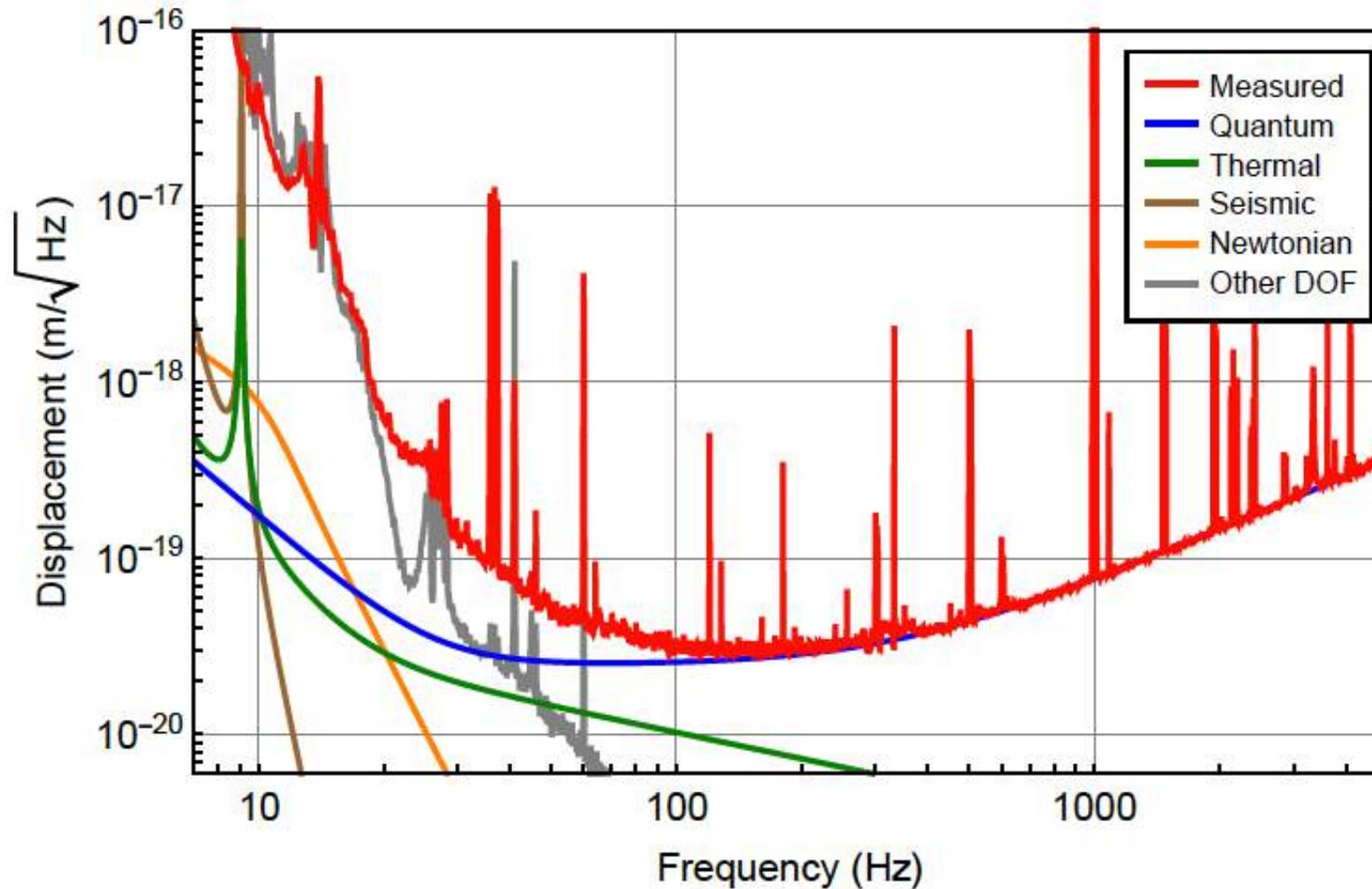




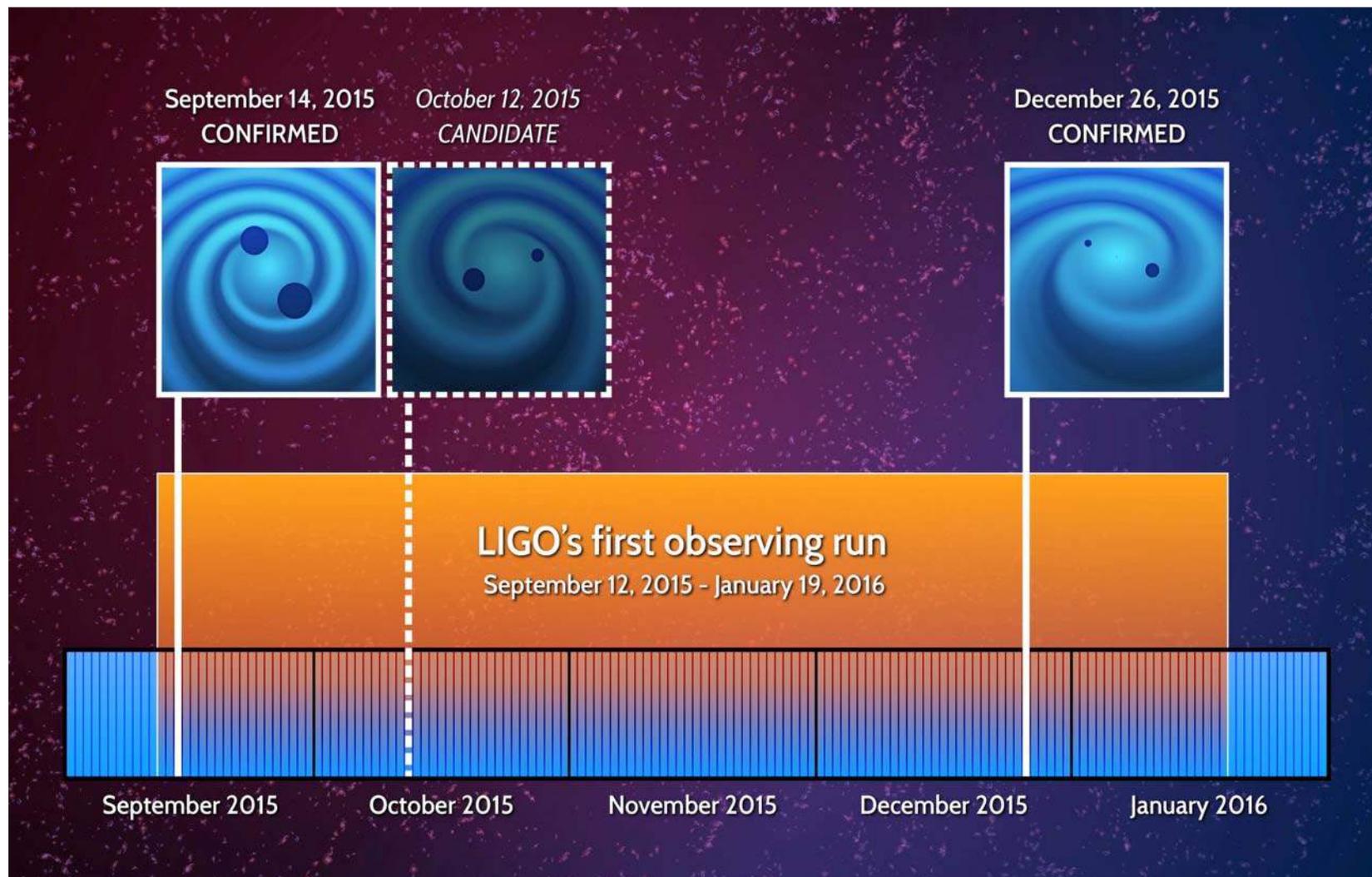




The Advanced LIGO Detector Sensitivity During O1



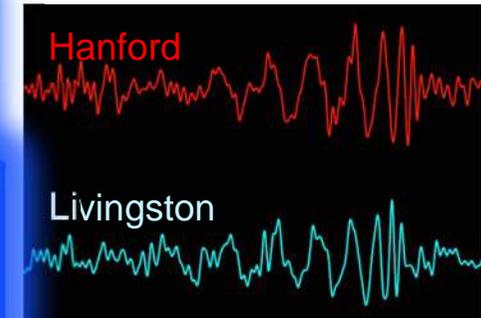
Abbott, et al. ,LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries", Phys. Rev. Lett. **116**, 131103 (2016).





Extracting Astrophysical Parameters from Detections

| | GW150914 | GW151226 | LVT151012 |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$ | $36.2^{+5.2}$ GW150914 | $14.2^{+8.3}$ GW151226 | 23^{+18} LVT151012 |
| Radiated energy $E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$ | $3.0^{+0.5}_{-0.4}$ | $1.0^{+0.1}_{-0.2}$ | $1.5^{+0.3}_{-0.4}$ |
| Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$ | $3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$ | $3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$ | $3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$ |
| Luminosity distance D_L/Mpc | 420^{+150}_{-180} | 440^{+180}_{-190} | 1000^{+500}_{-500} |
| Source redshift z | $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ | $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ | $0.20^{+0.09}_{-0.09}$ |
| Sky localization $\Delta\Omega/\text{deg}^2$ | 230 | 850 | 1600 |
| Final spin a_f | $0.68^{+0.05}_{-0.06}$ | $0.74^{+0.06}_{-0.06}$ | $0.66^{+0.09}_{-0.10}$ |



Abbott, et al., LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "Binary Black Hole Mergers in the first Advanced LIGO Observing Run", <https://arxiv.org/abs/1606.04856>, accepted in Phys. Rev. X

今回の検出の意味

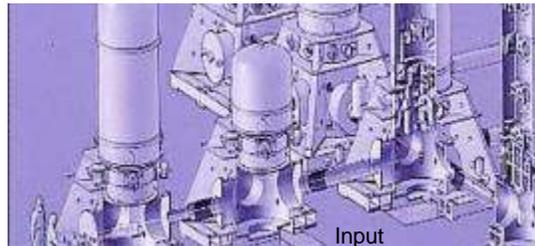
- ブラックホール連星とその合体の存在の直接観測
- 重いブラックホールの存在の実証→小金属環境での形成の示唆？
- ブラックホール合体頻度： $10\text{-}240 / \text{Gpc}^3 \text{ yr}$
- 強重力場での初の一般相対性理論のテスト→矛盾せず

現状と今後

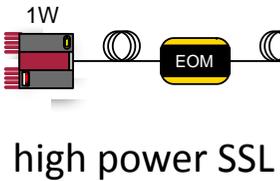
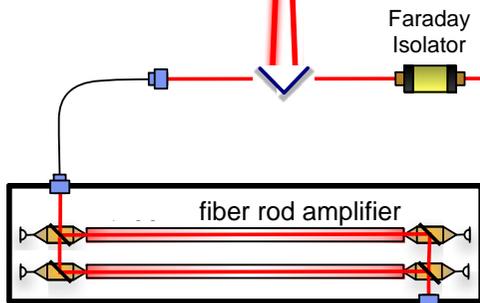
- 2度目の観測 (O2)
 - 2016.11.30にスタート
 - 6か月間の予定
 - 感度 LLO:1/2目標感度、LHO:1/3目標感度
- O2以降
 - 目標感度の達成を目指す (200Mpc BNS, 1.3Gpc BBH)
 - 5年以内に、2度の観測
 - 装置のアップグレードにより、さらなる感度向上を目指す (350Mpc BNS, 2.2Gpc BBH)
 - LIGO-India観測開始 2024
- 将来
 - 初代星の形成を観測可能な新しい観測器ネットワークを建設

Ad Virgo in a nutshell

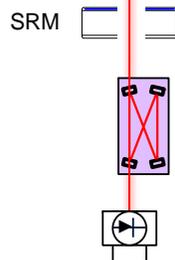
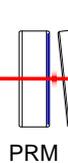
Larger central vacuum links



Input Mode Cleaner



Faraday Isolator



DC detection



WE heavier mirrors (42 kg)



larger beam waist

signal recycling

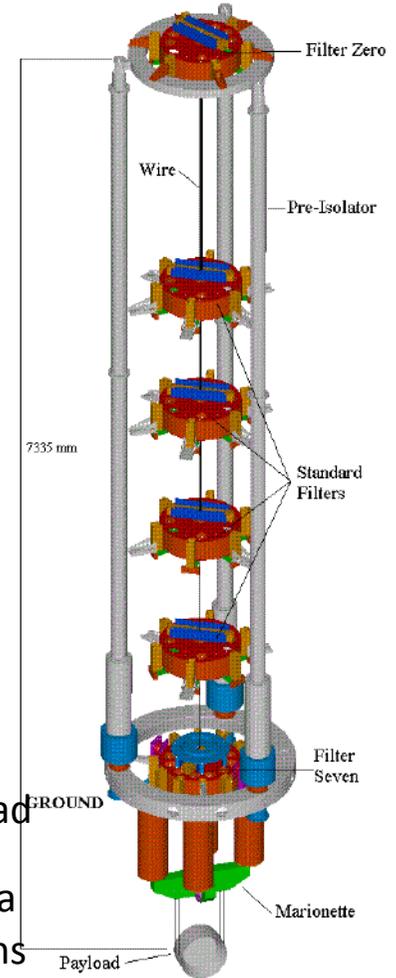
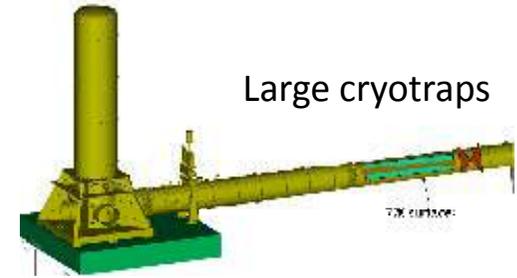
new IP tilt control

38

new payload

fused silica suspensions

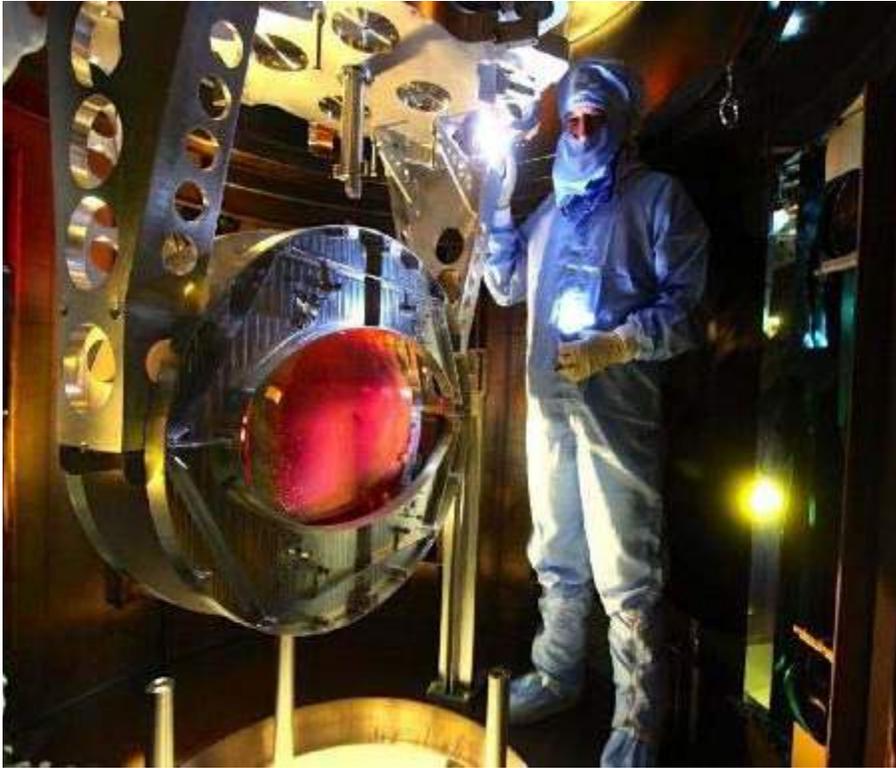
Large cryotrap





Payloads

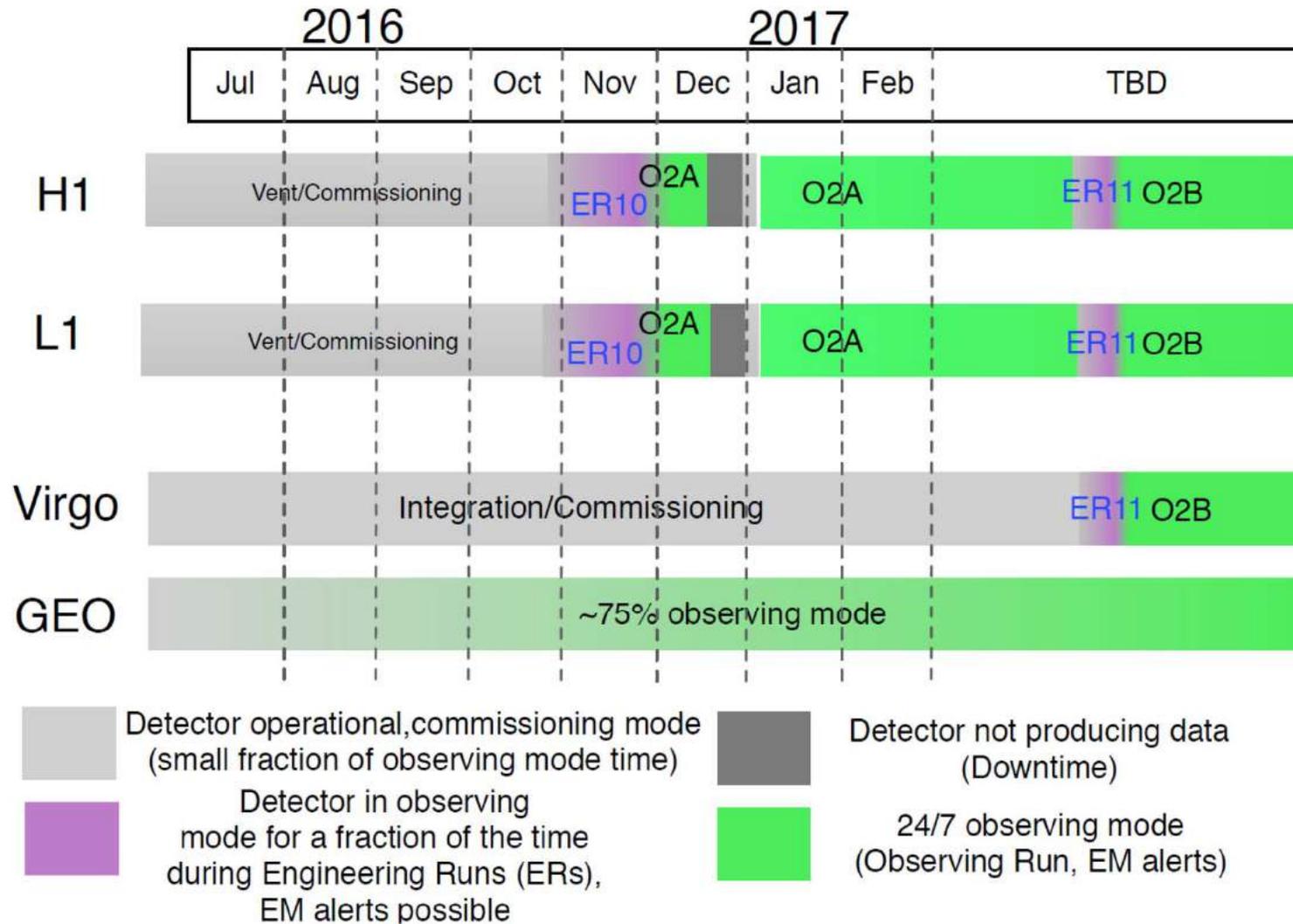
Beam Splitter integrated hooked to the super attenuator (now in vacuum)



Input mirror payloads of the FP cavities assembled and integrated in the super attenuator vacuum chamber



O2 TIMELINE



KAGRA

重力波を検出し
重力波天文学を創成する





KAGRA

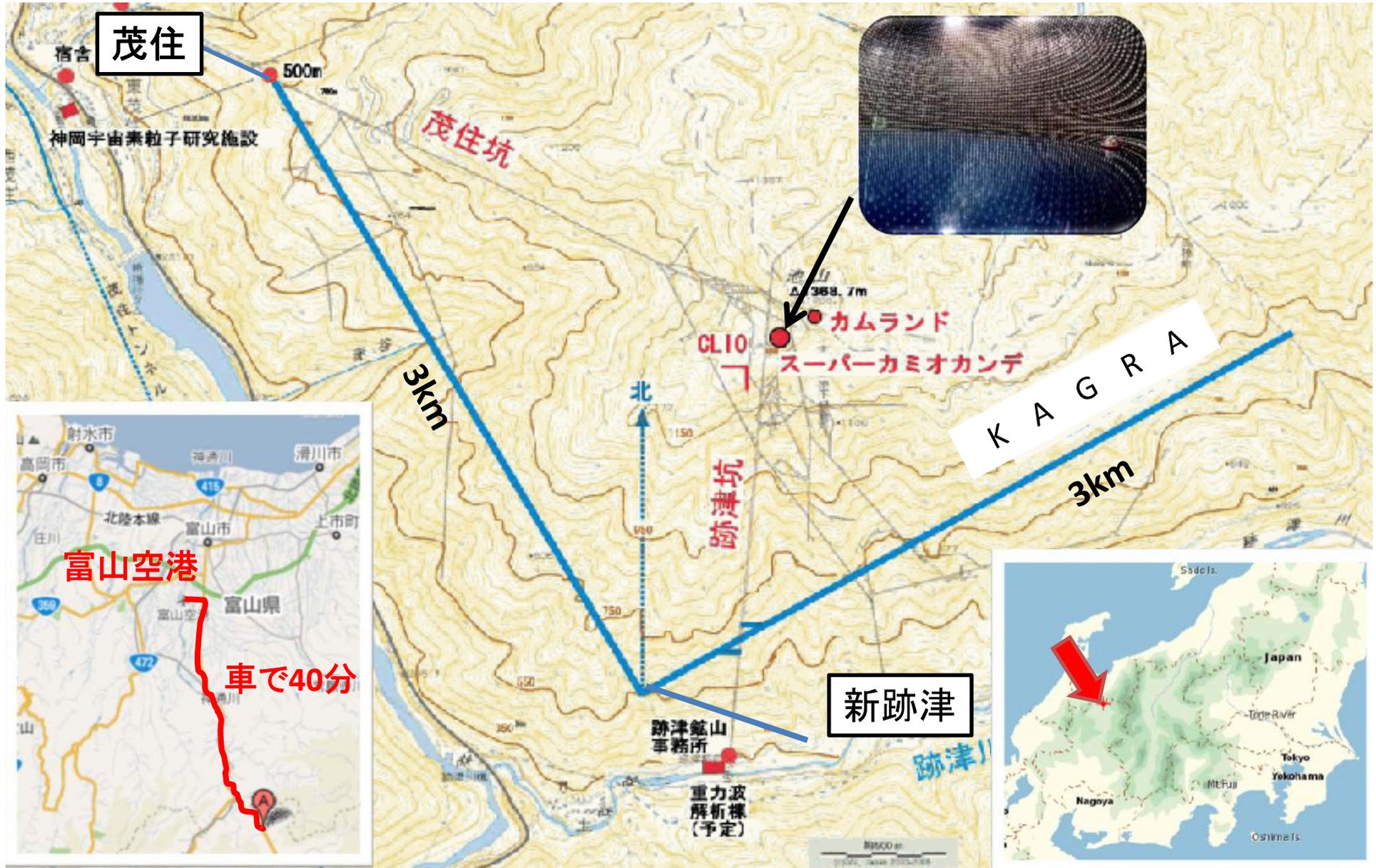
低温ミラー

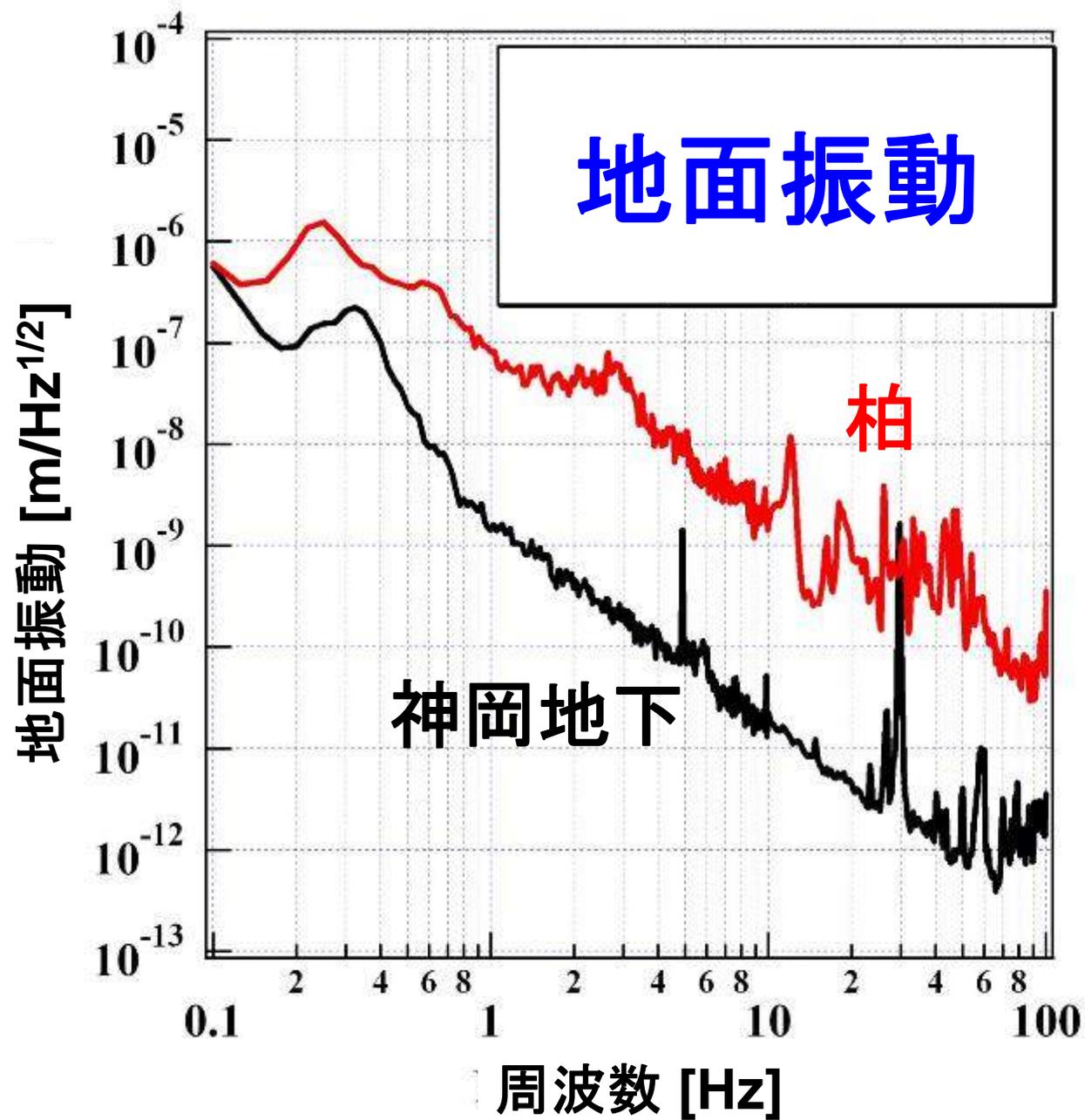


地下



神岡





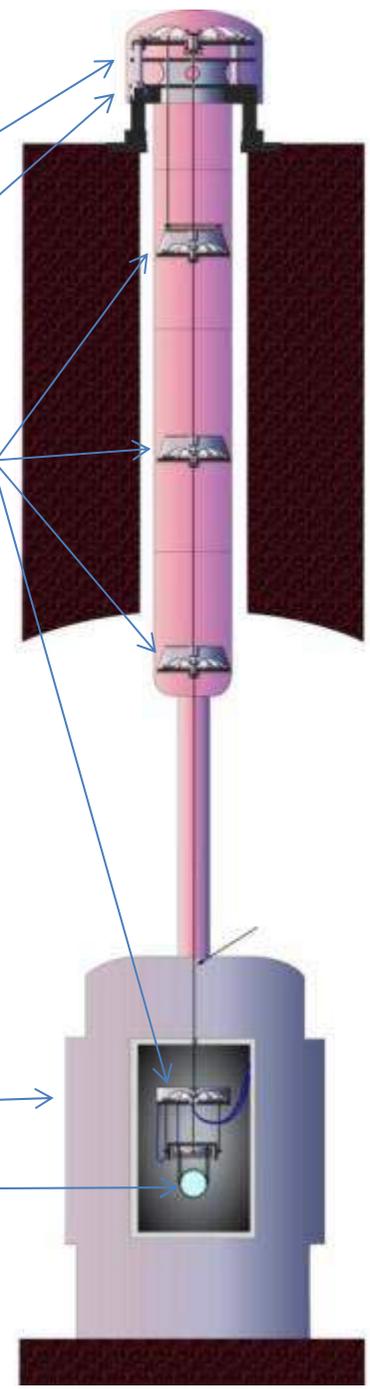
トンネル (2階)

チェンバー
倒立振り子

GAS フィルター

チェンバー
鏡

トンネル (1階)



超高防振システム

鏡の振動

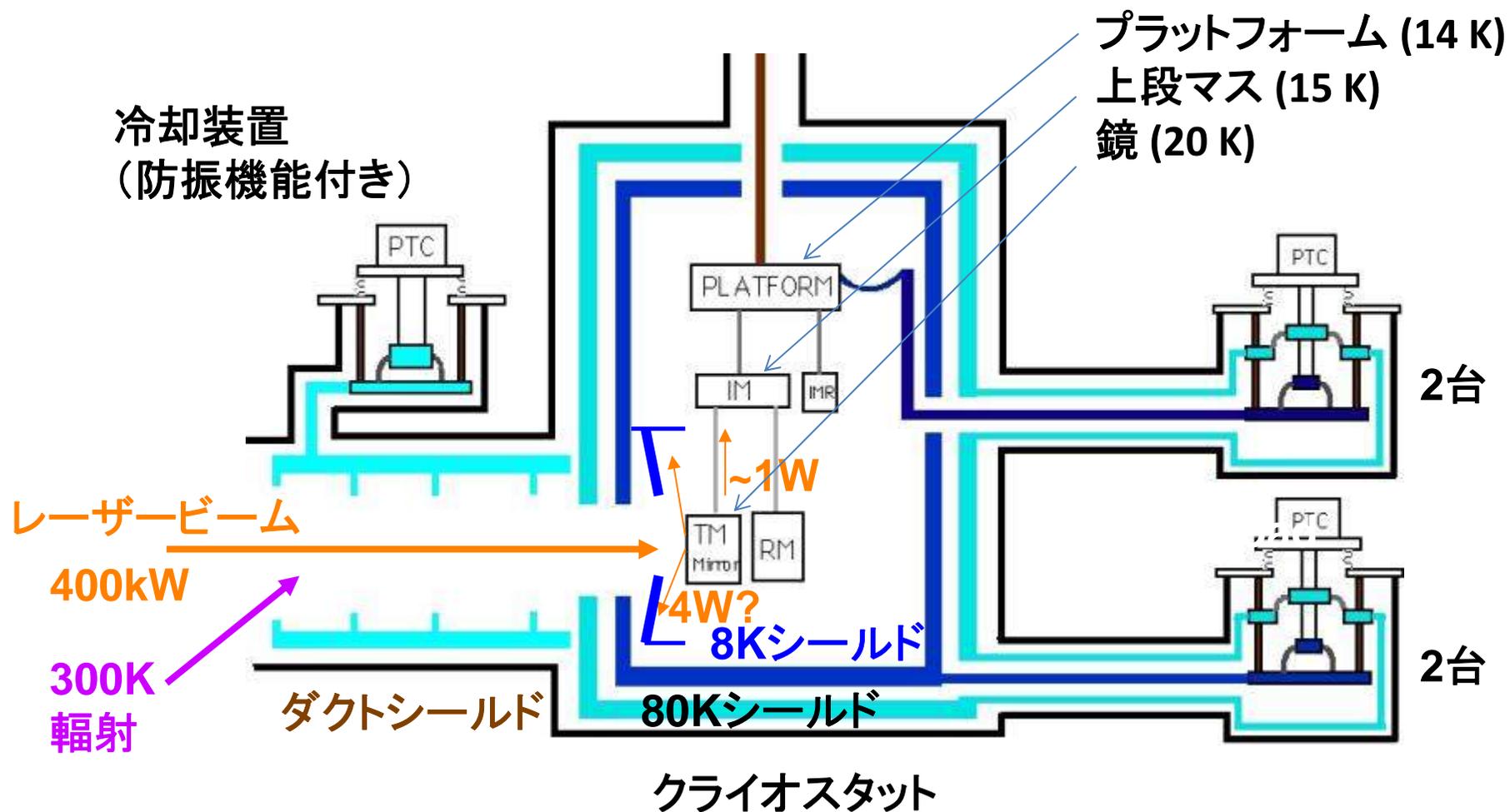
$10^{-11} \text{ mHz}^{-1/2}$



$10^{-18} \text{ mHz}^{-1/2}$

@10 Hz

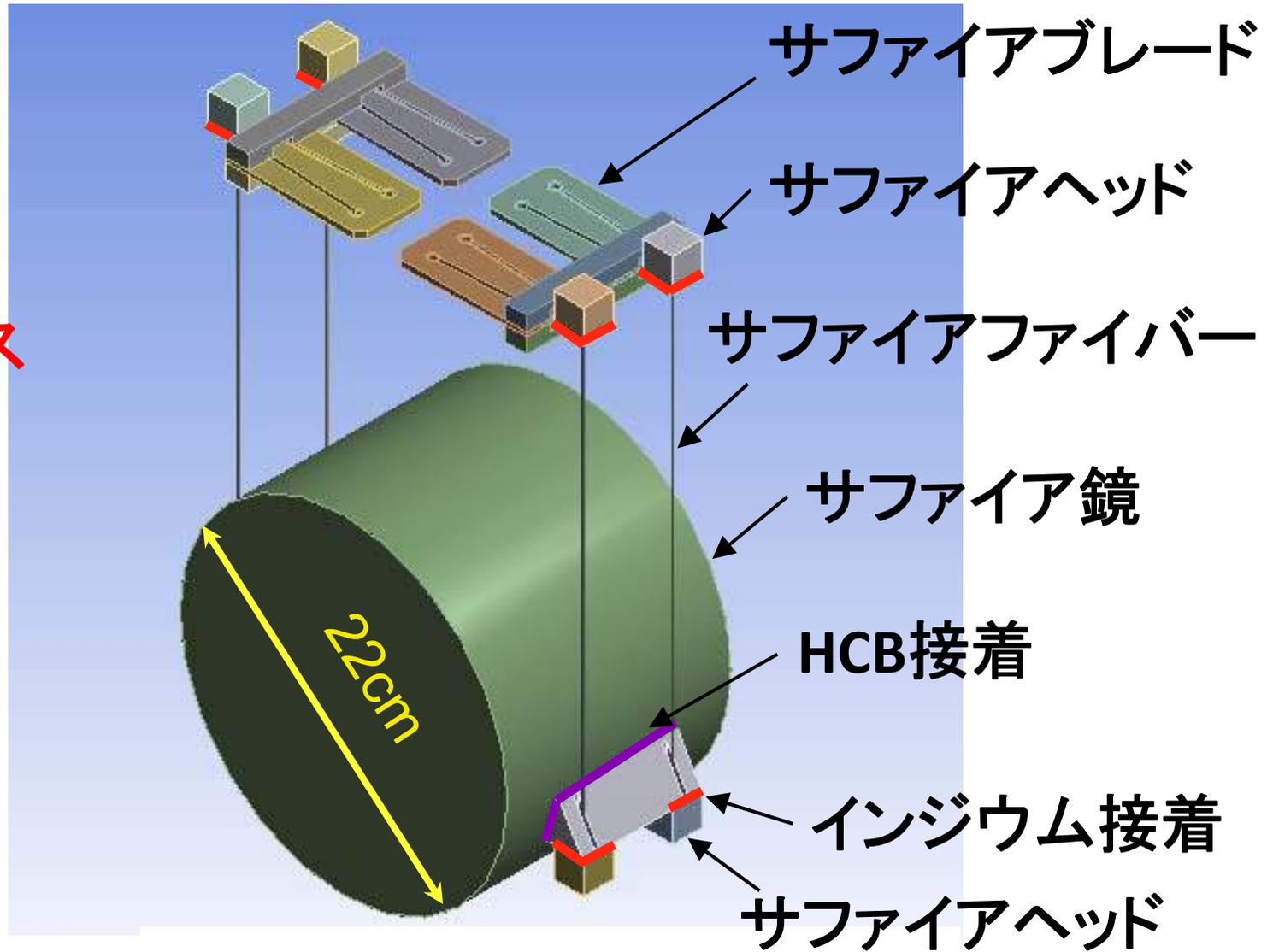
冷却システム



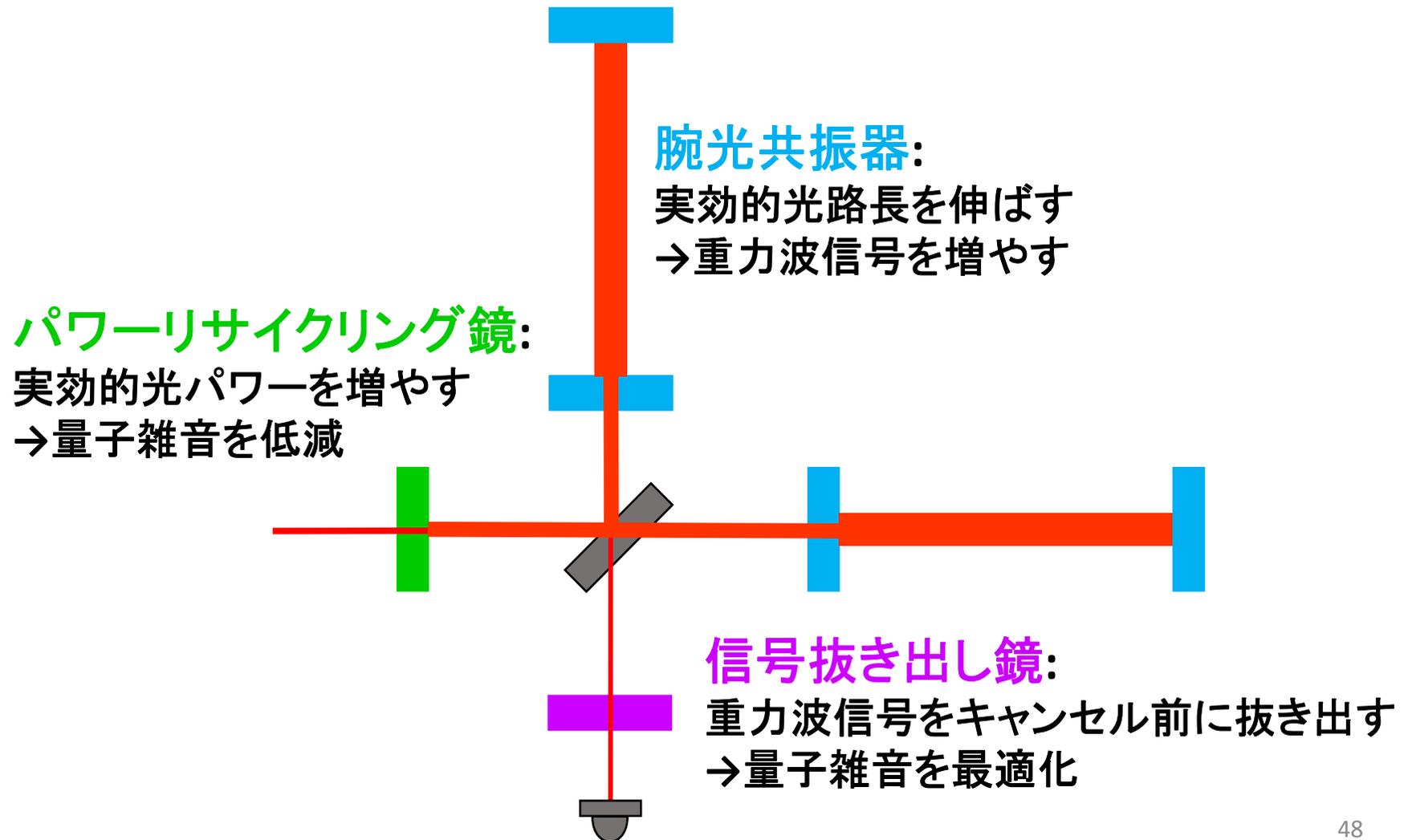
低温懸架システム

[要求]

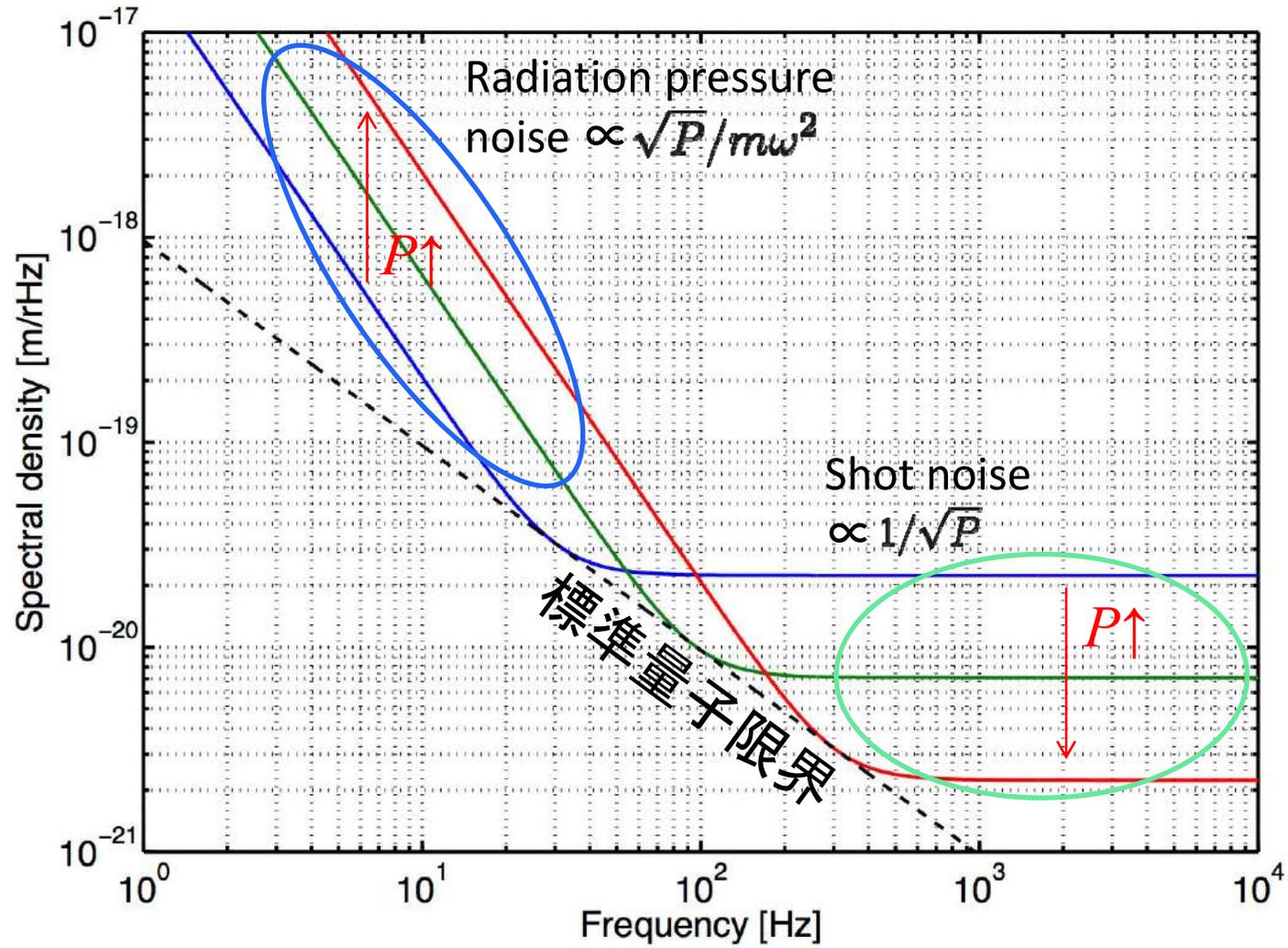
- 強度
- 熱伝導率
- 機械的ロス



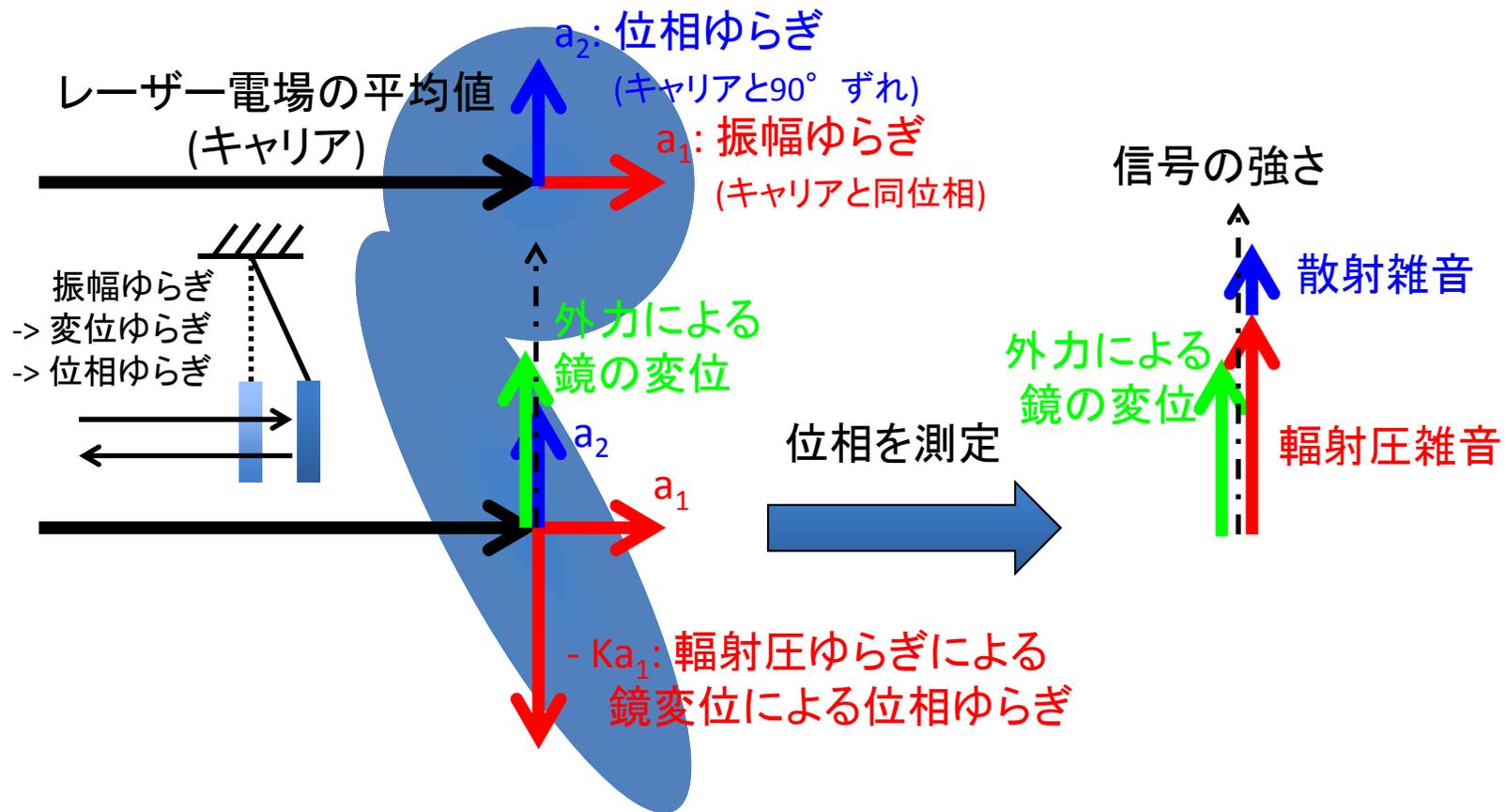
帯域可変型干渉計



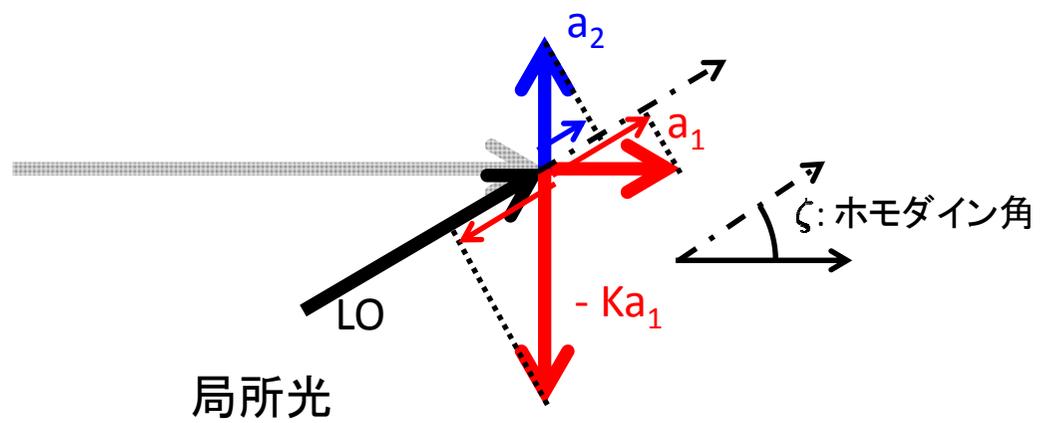
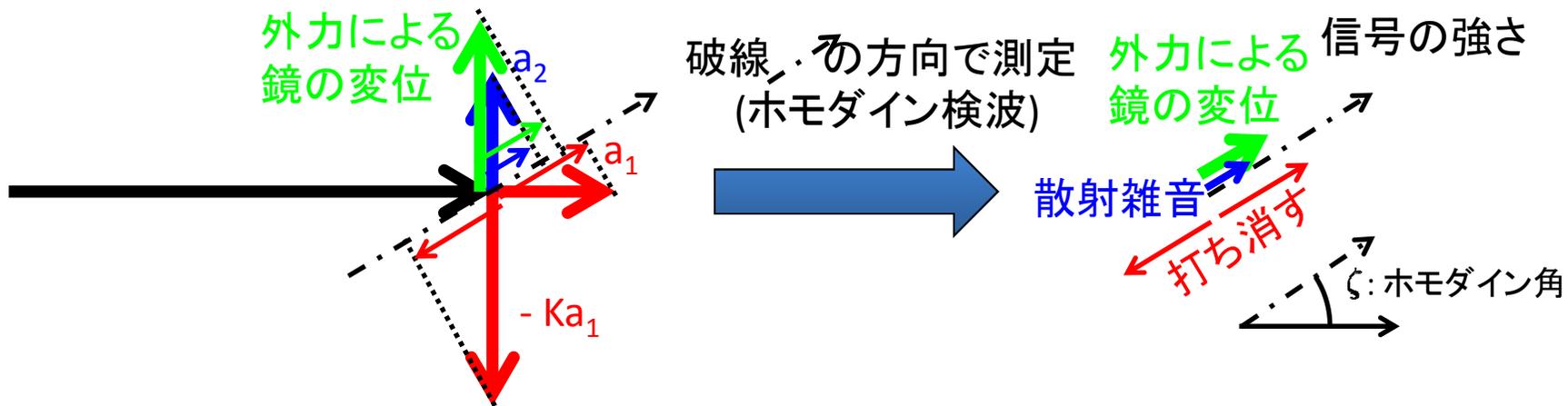
量子雑音



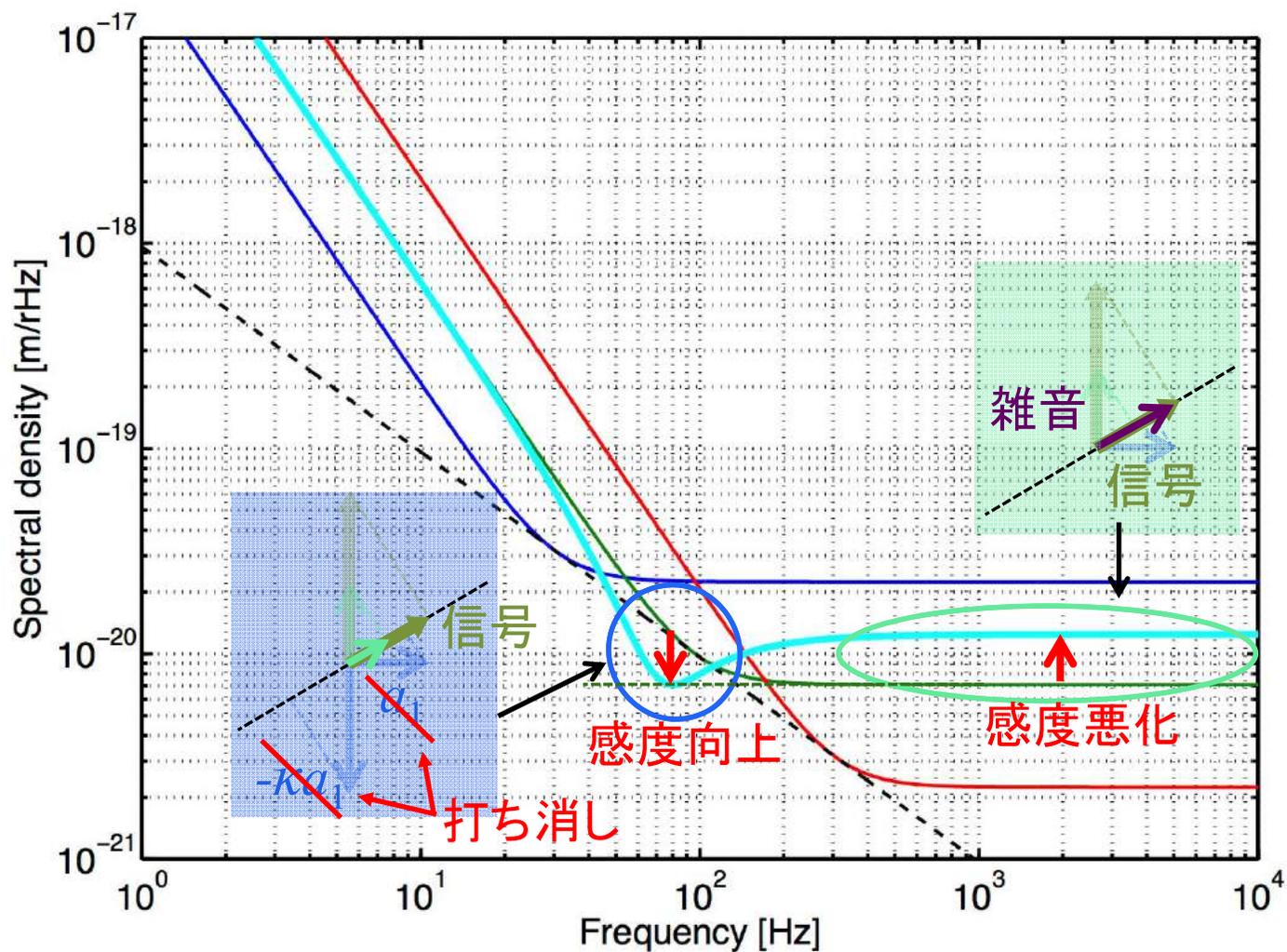
ポンディロモーティブスキージング



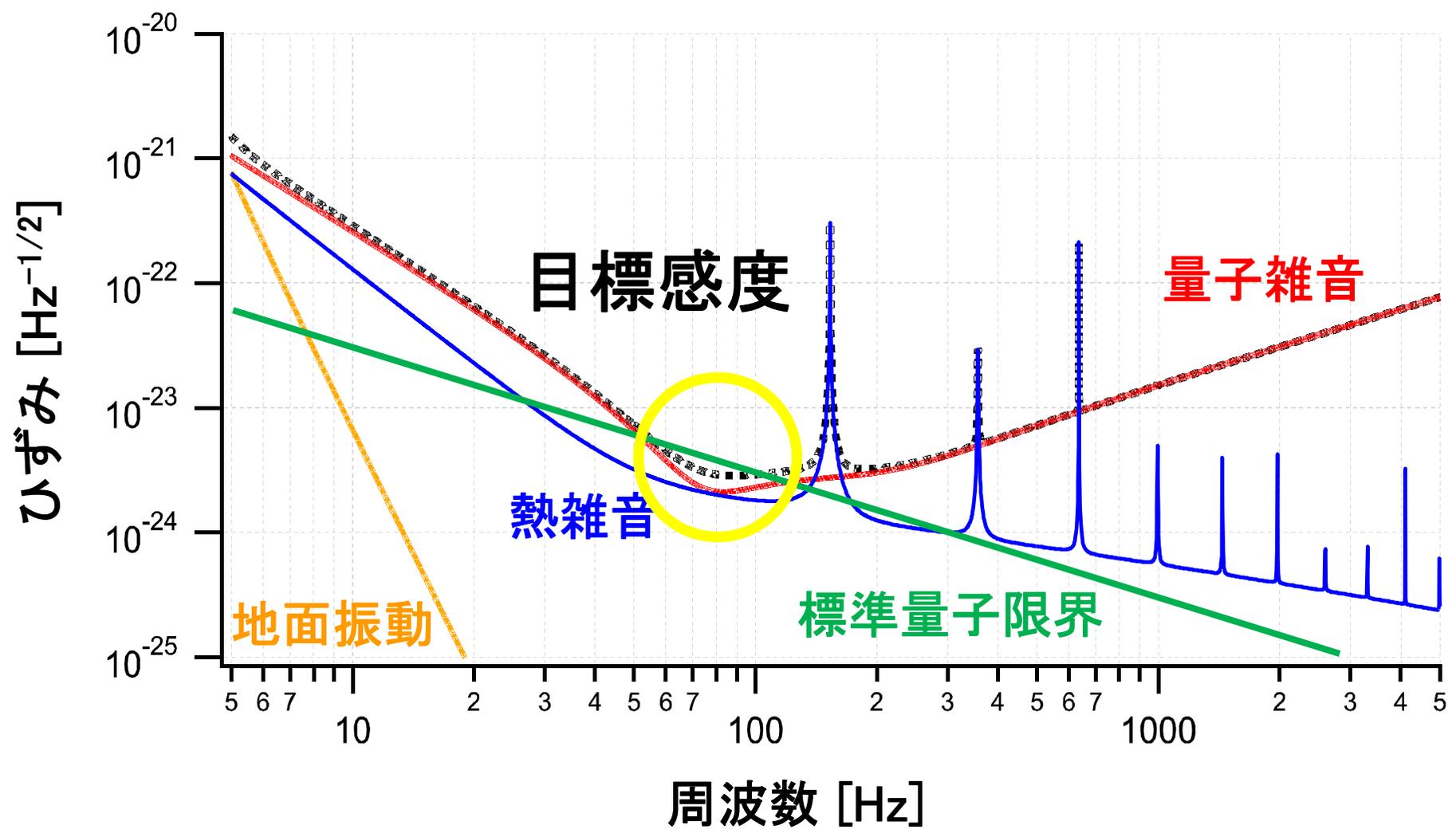
ホモダイン検波



輻射圧雑音の低減



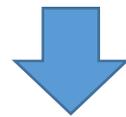
KAGRAの目標感度



中性子星連星の合体からの重力波

検出レンジ: ~7億光年

1銀河あたりの合体頻度: ~1万年に1回



検出頻度: ~1年に10回

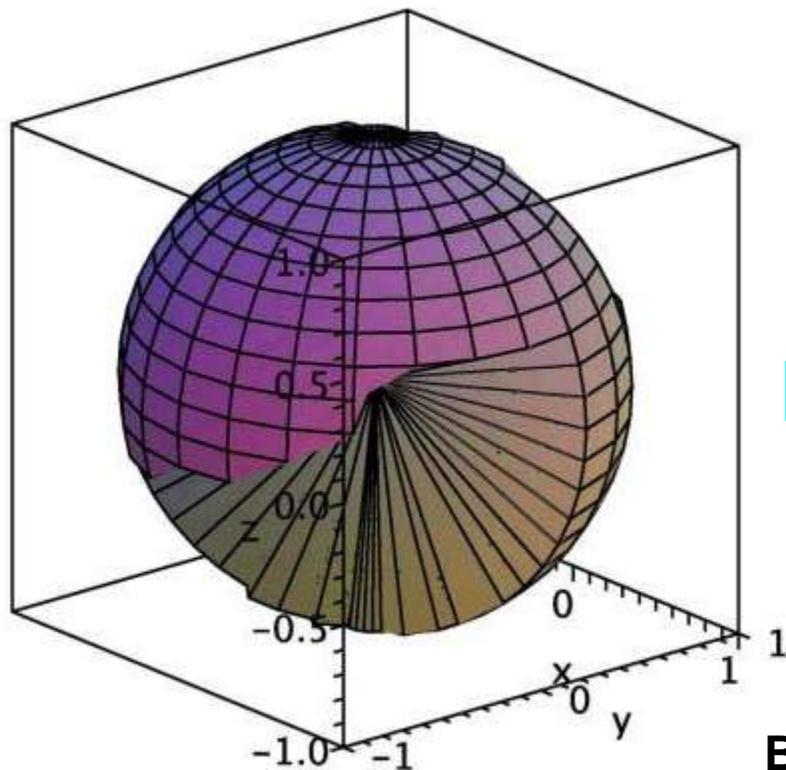
検出が期待される他の重力波源

- **ブラックホール連星の合体** : 太陽質量の20倍程度で60億光年遠方、 10^{-240} /Gpc³ yr
- **超新星爆発** : 330万光年遠方?、数十年に1回
- **パルサー** : クラブ、ベラ、銀河系内の見えていないパルサー
- **初期宇宙** (標準モデルでないもの)
- **謎の天体** (自然は我々を驚かすのが好き!)

国際観測ネットワークにおける KAGRAの意義

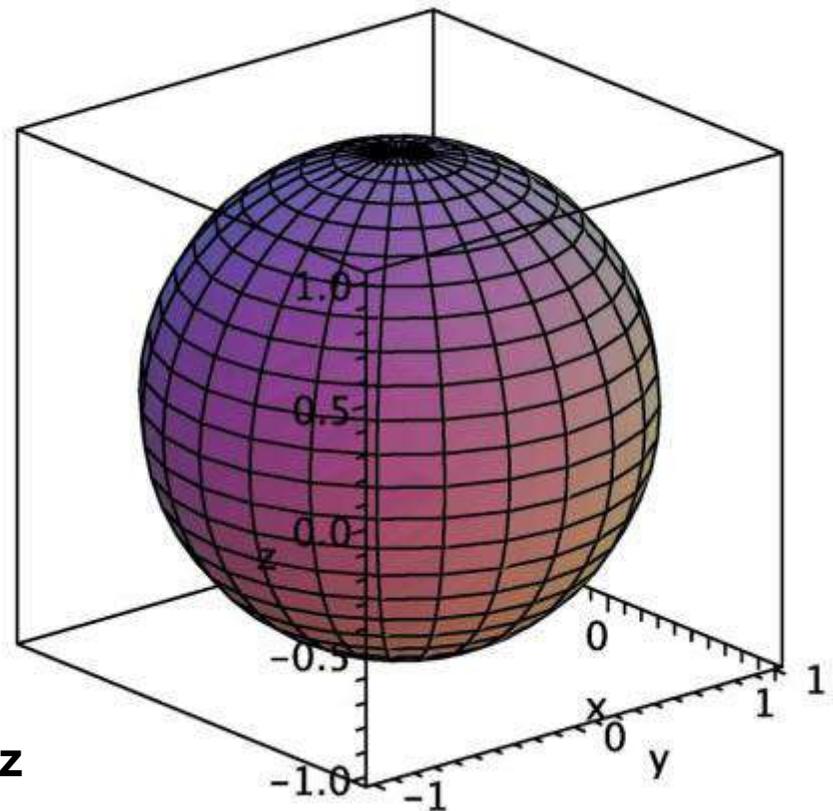
LIGO(H)+LIGO(L)+Virgo

- 全天カバー率(1/2*MS): 72%
- 3台同時の稼働率: 51%



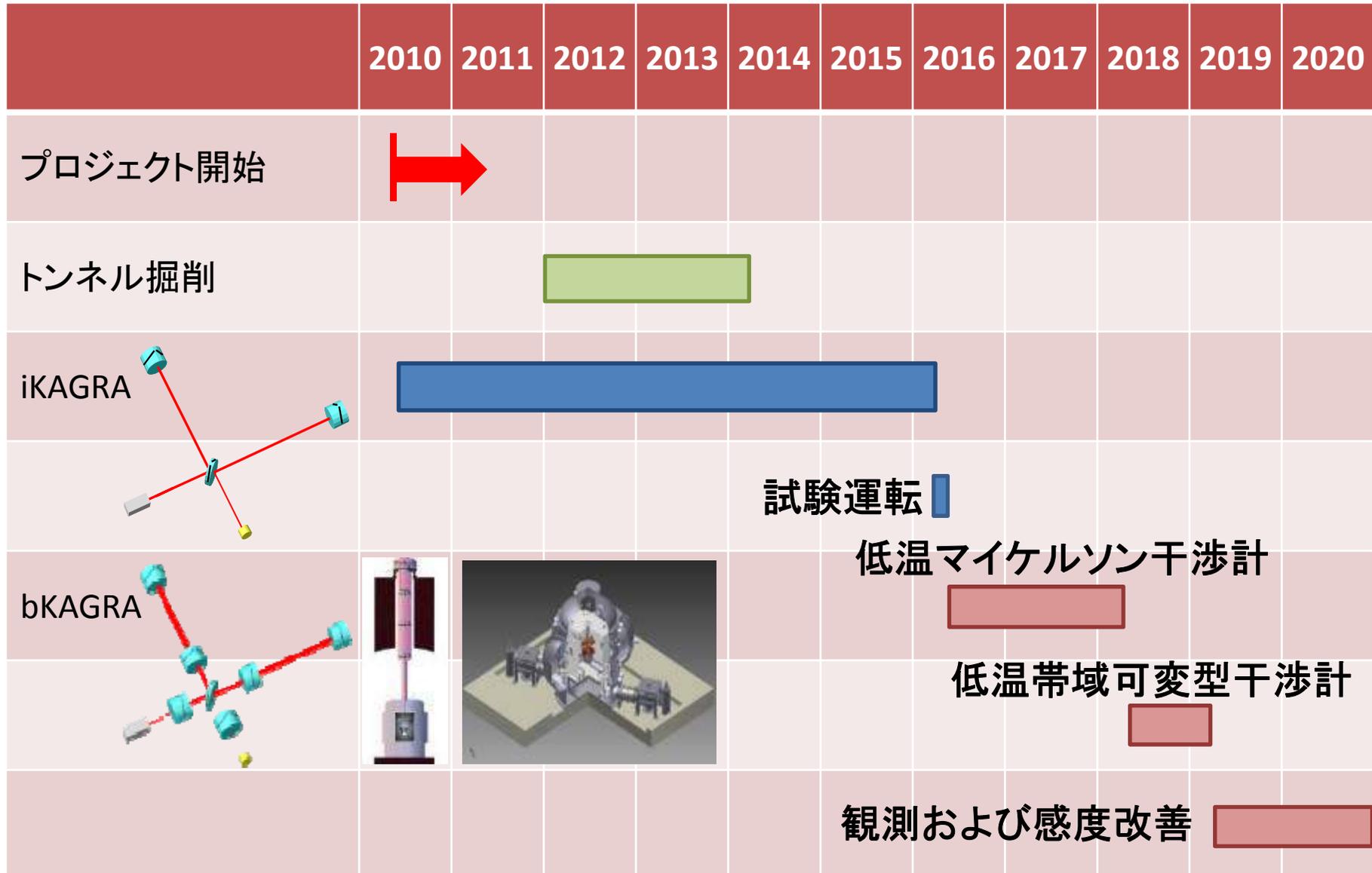
LIGO(H)+LIGO(L)+Virgo+KAGRA

- 最大感度: +13%
- 全天カバー率(1/2*MS): 100%
- 3台同時の稼働率: 82%



B. F. Schutz

KAGRAのスケジュール





新跡津坑口
(2017.1.7)

中央エリア (2017.1.7)



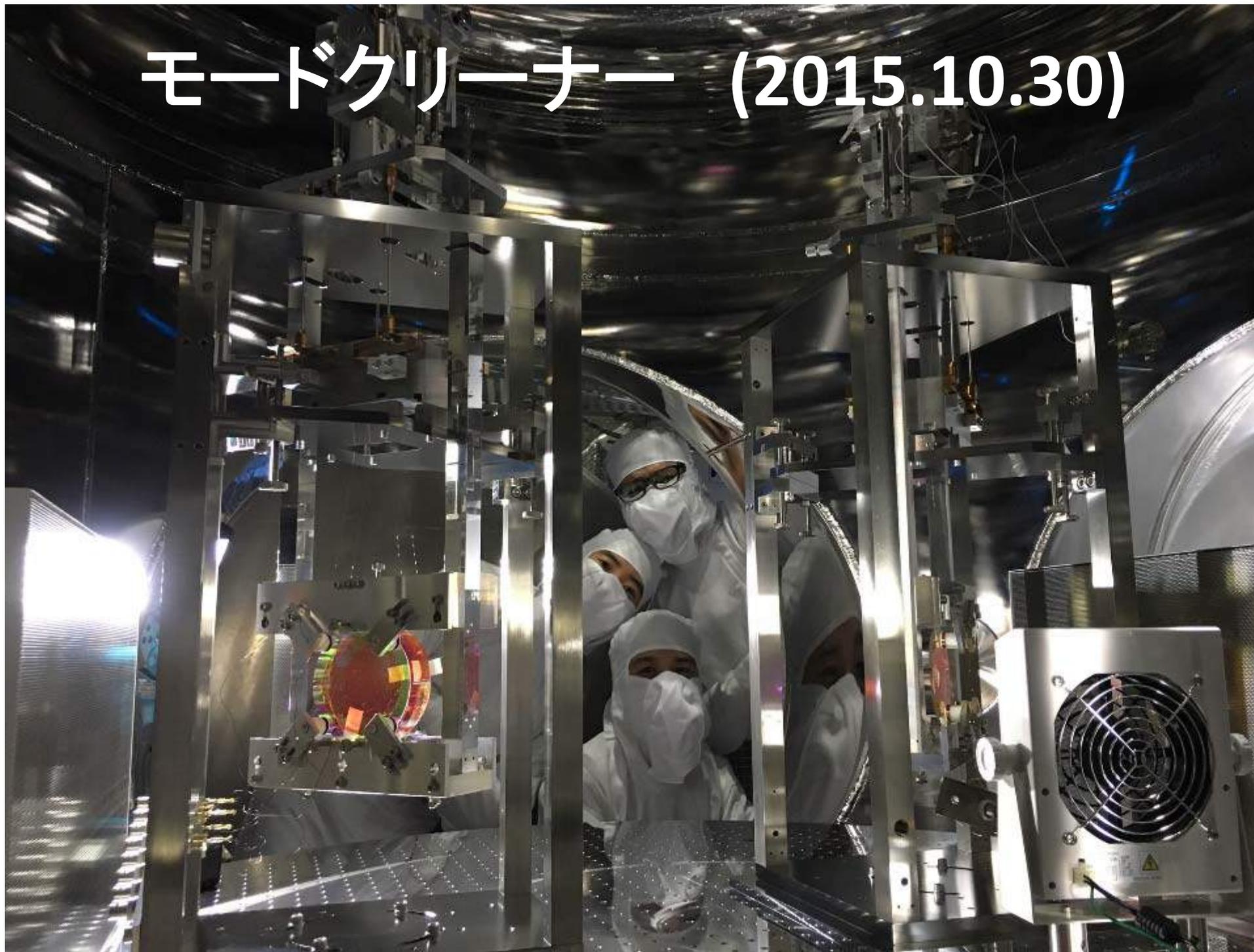
クライオスタット (2016.9.20)





安定化レーザー (2016.9.20)

モードクリーナー (2015.10.30)



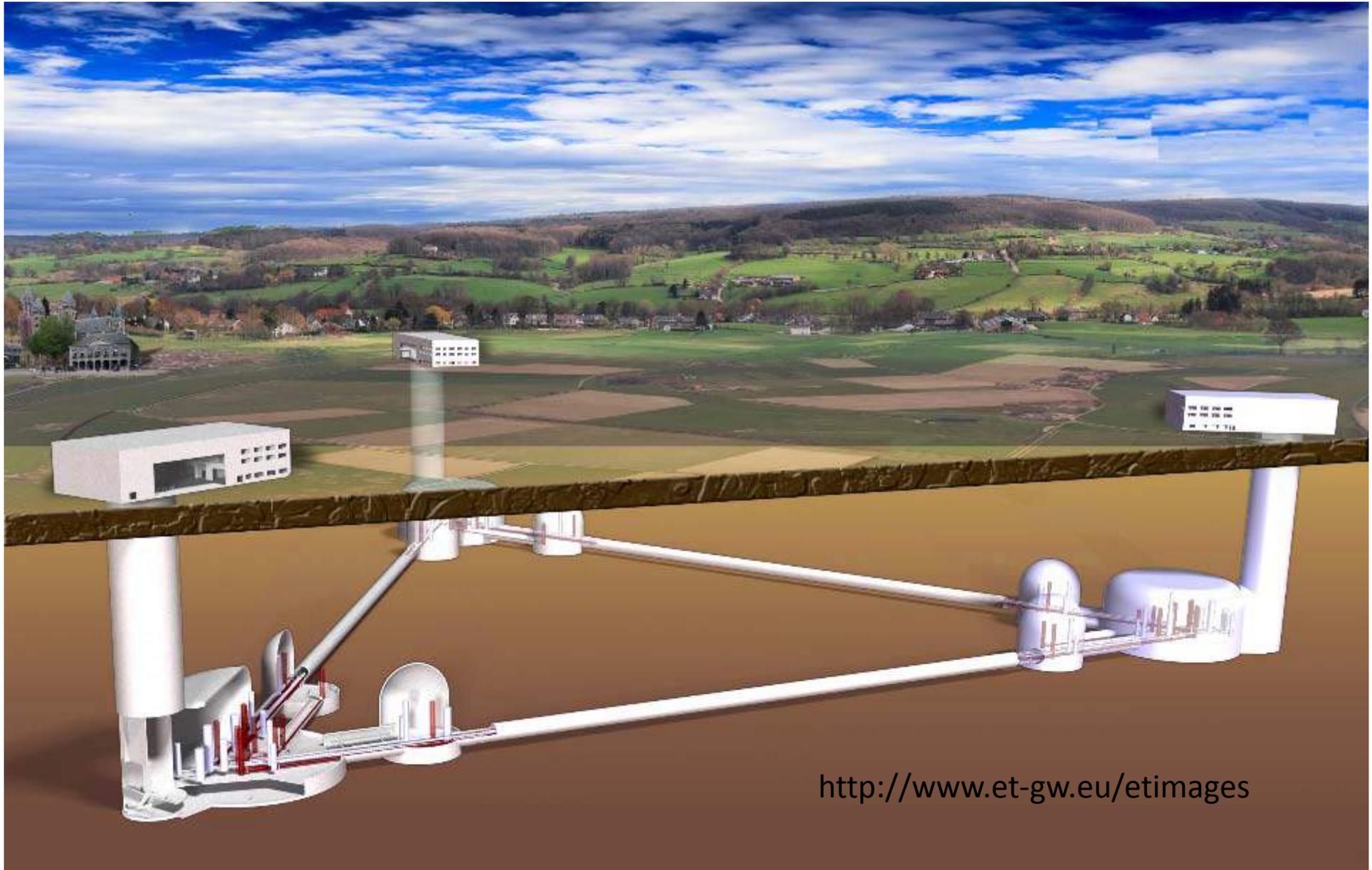
3km 真空パイプ (2016.2.8)



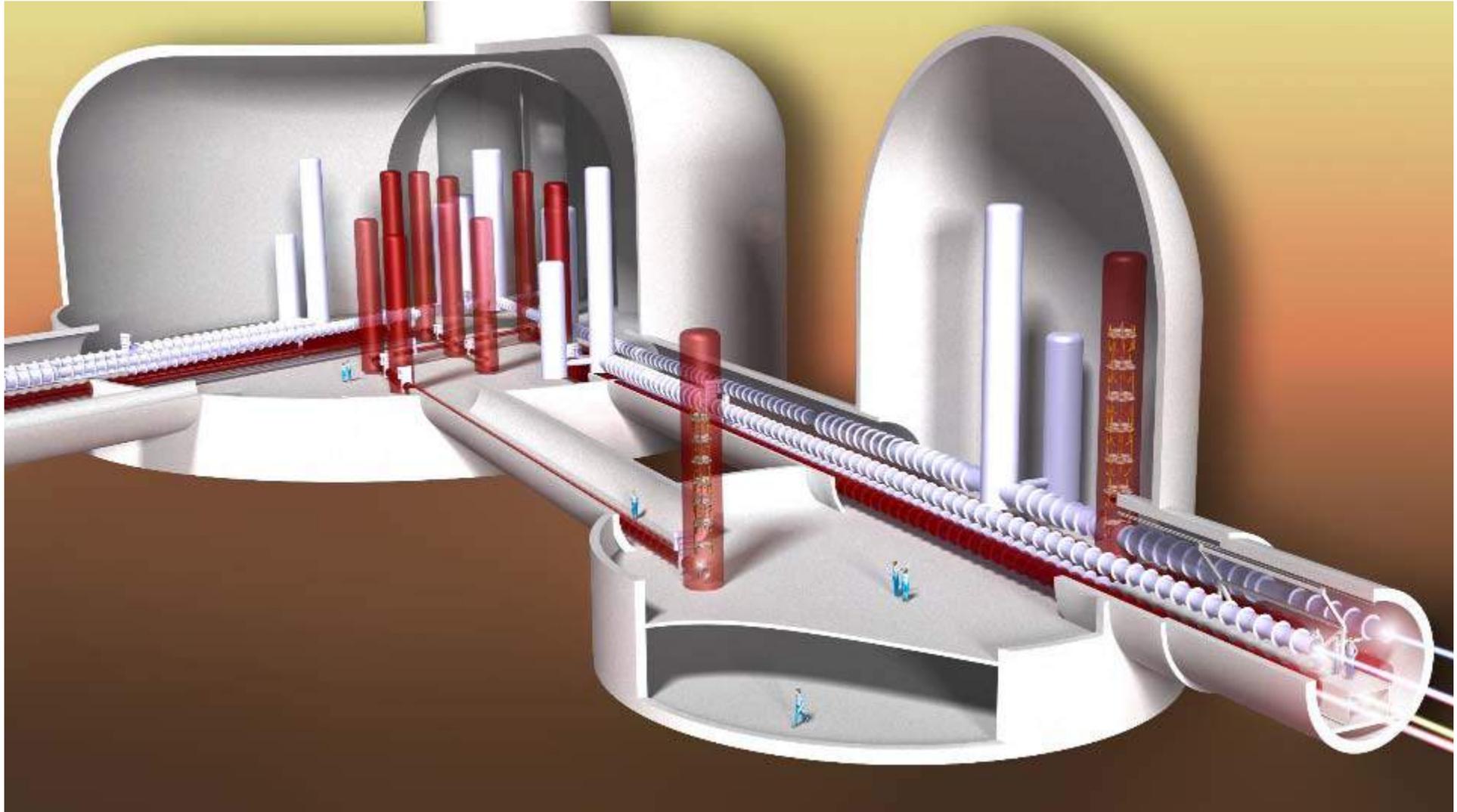


解析棟のコントロールルーム
(2016.2.9)

Einstein Telescope (ET)

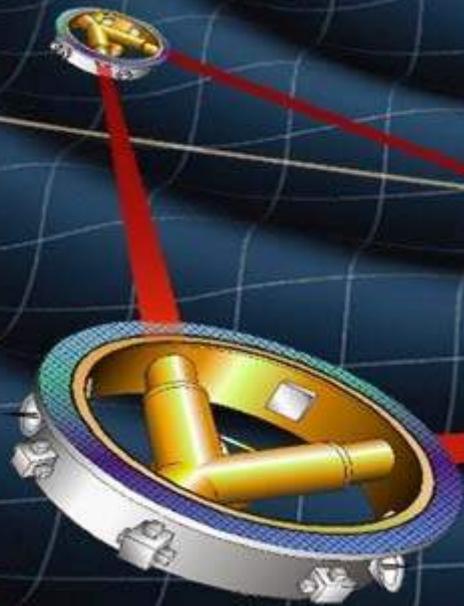


Central area



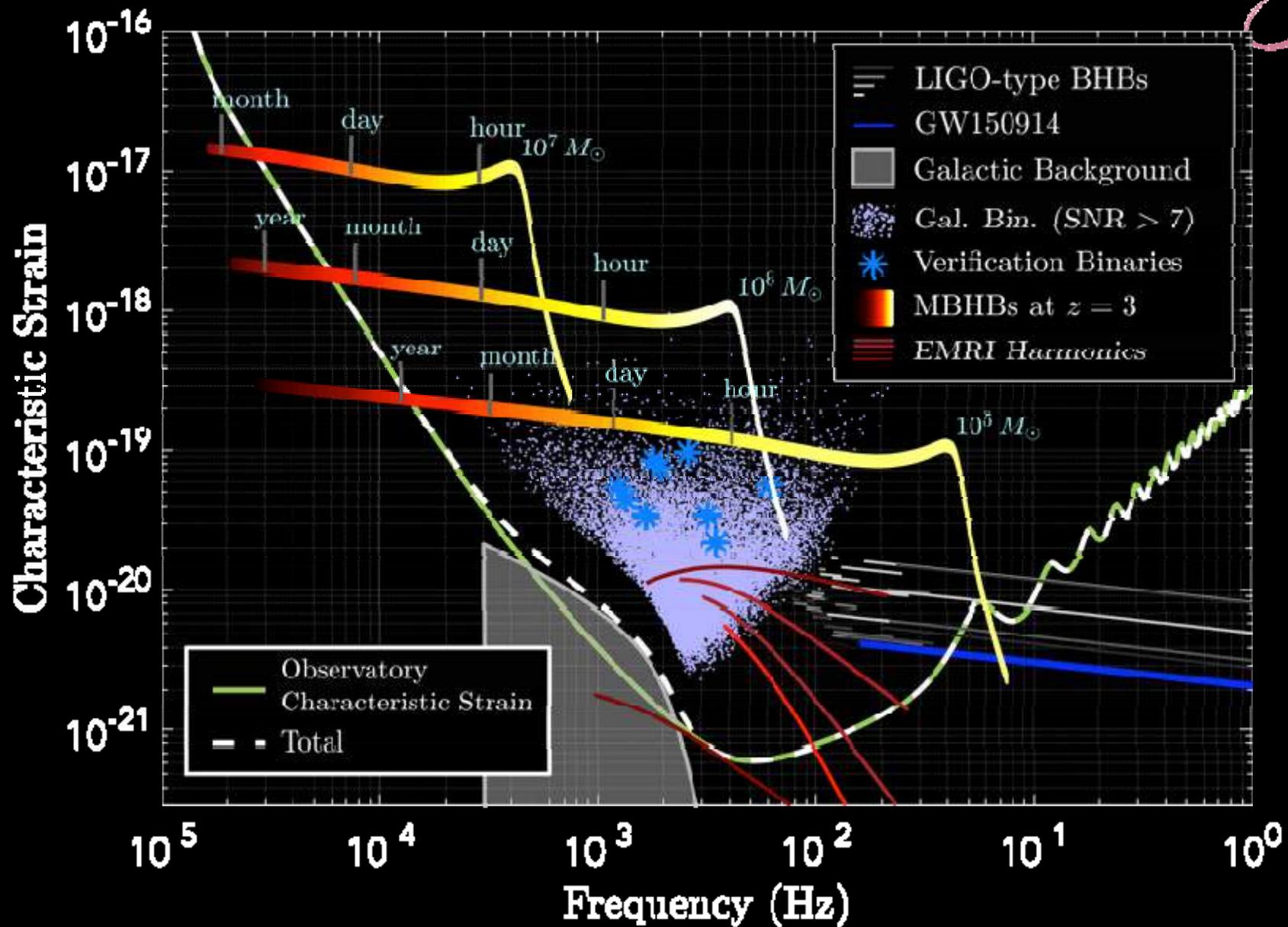
<http://www.et-gw.eu/etimages>

LISA: Opens the low-frequency gravitational universe

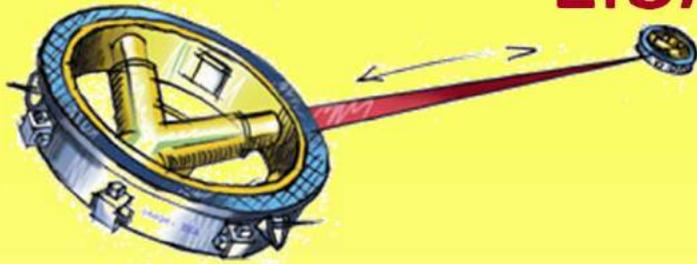


3 satellites
2.5 million km arms
50 million km behind Earth

LISA Sources



LISA Pathfinder



- Take one LISA arm
- Squeeze it into ONE satellite



Courtesy: Stefano Vitale



100 Years since GR Publication: Dec. 2, 2015



Countdown to LPF Launch

LPF has launched!

LISA Pathfinder Mission Timeline



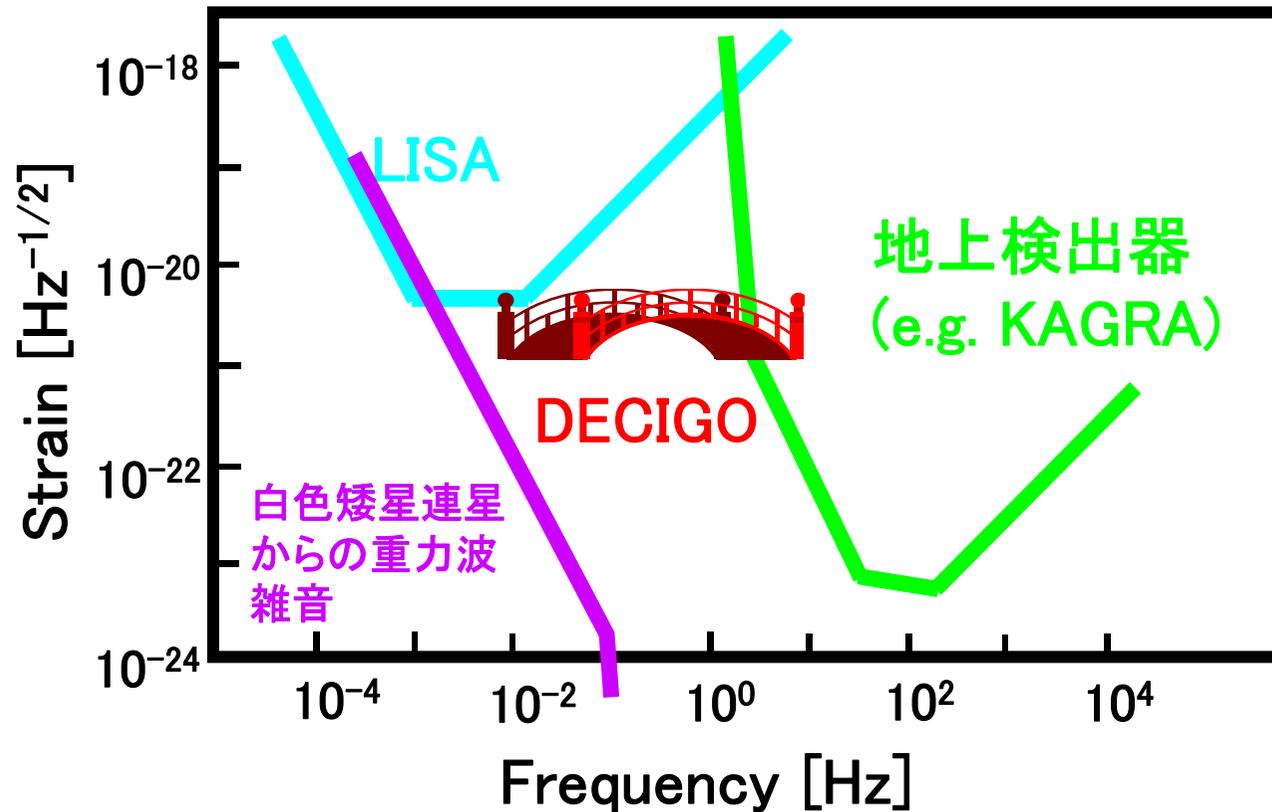
スペース重力波アンテナ
DECIGO計画



DECIGOとは？

Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory

- LISAと地上検出器の帯域のギャップを狙う
- 超高感度の実現が可能！

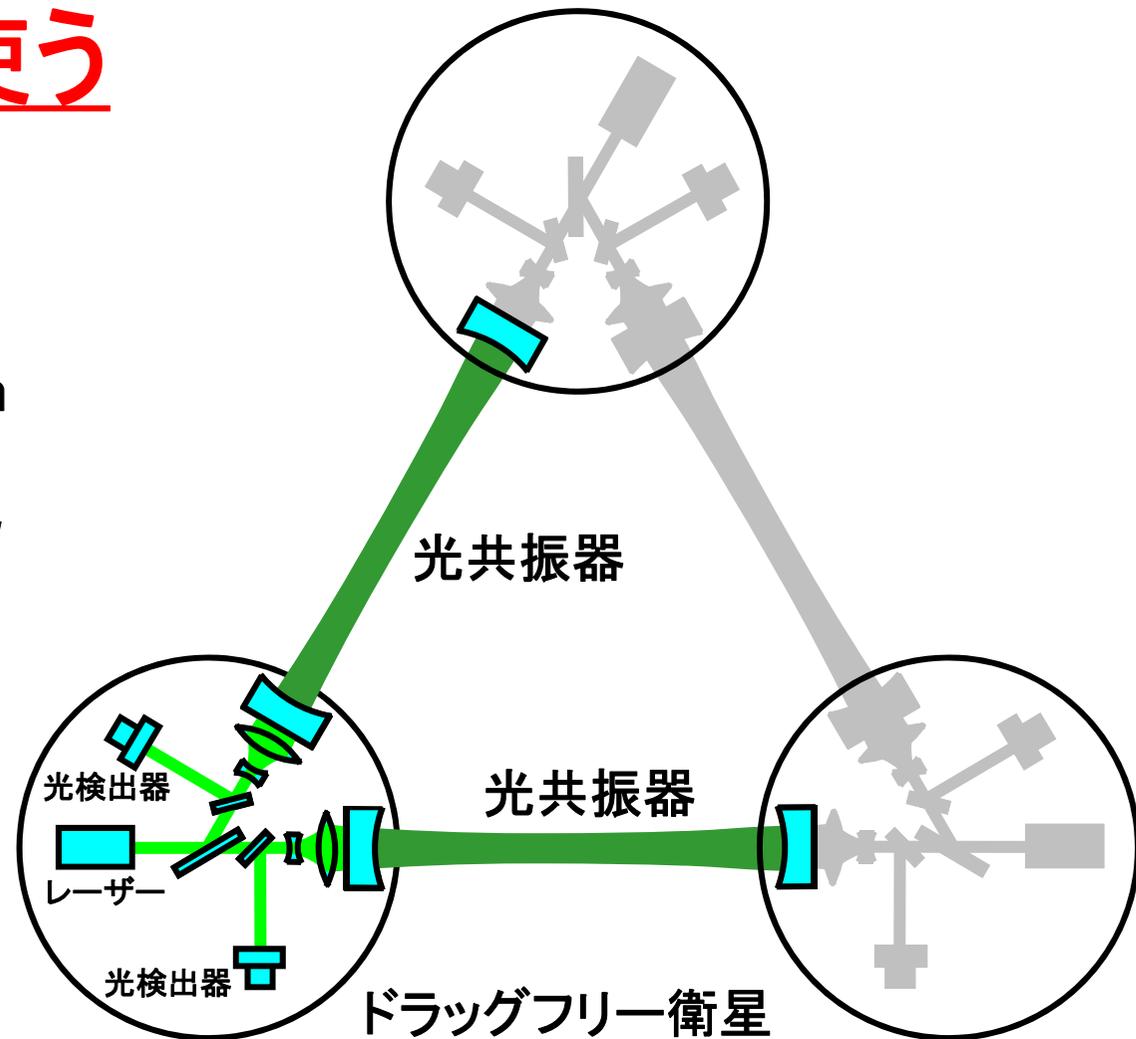


予備概念設計

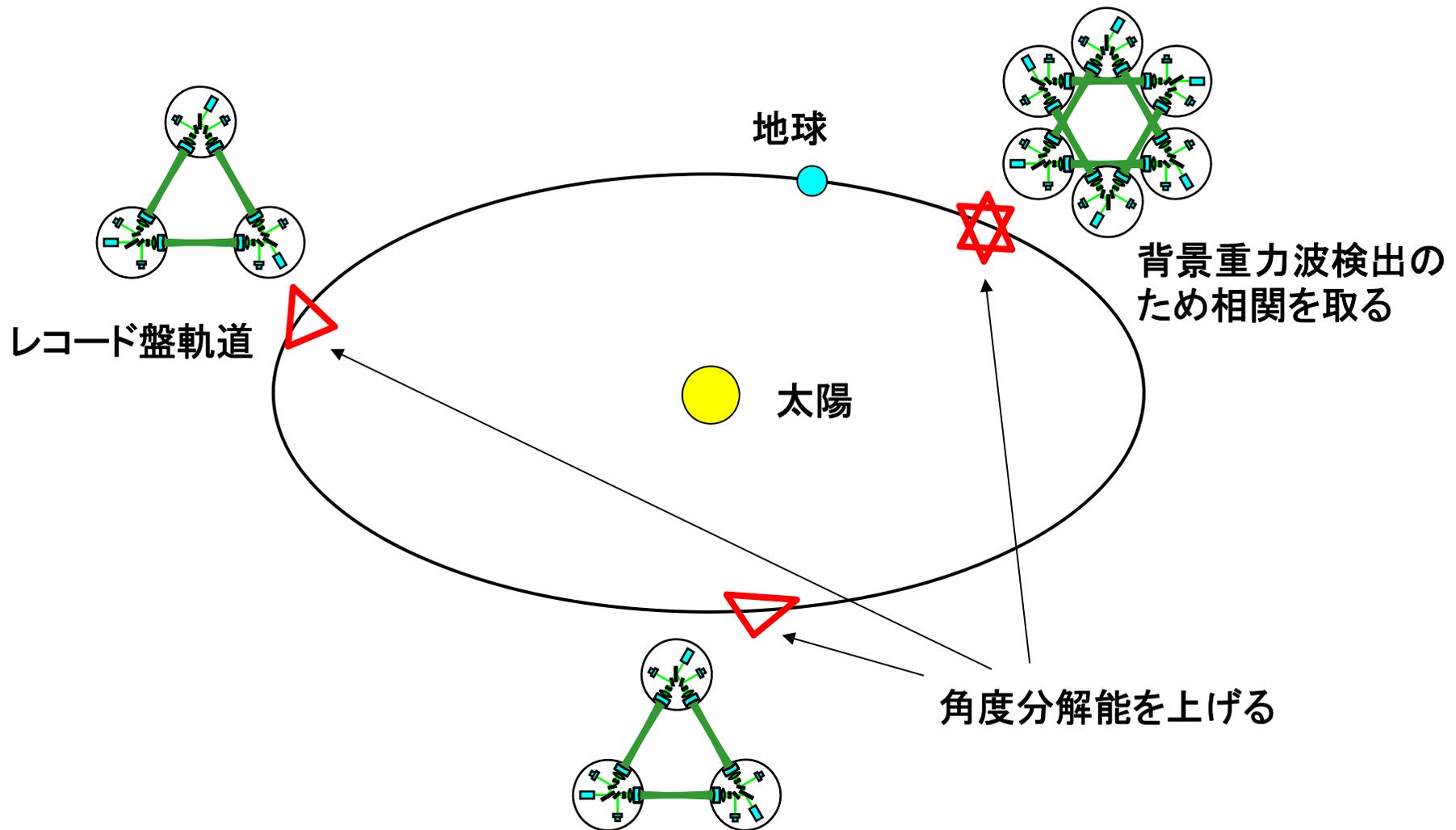
光共振器を使う

アーム長: 1000 km
ミラー直径: 1 m
レーザー波長: 532 nm
フィネス: 10
レーザーパワー: 10 W
ミラー質量: 100 kg

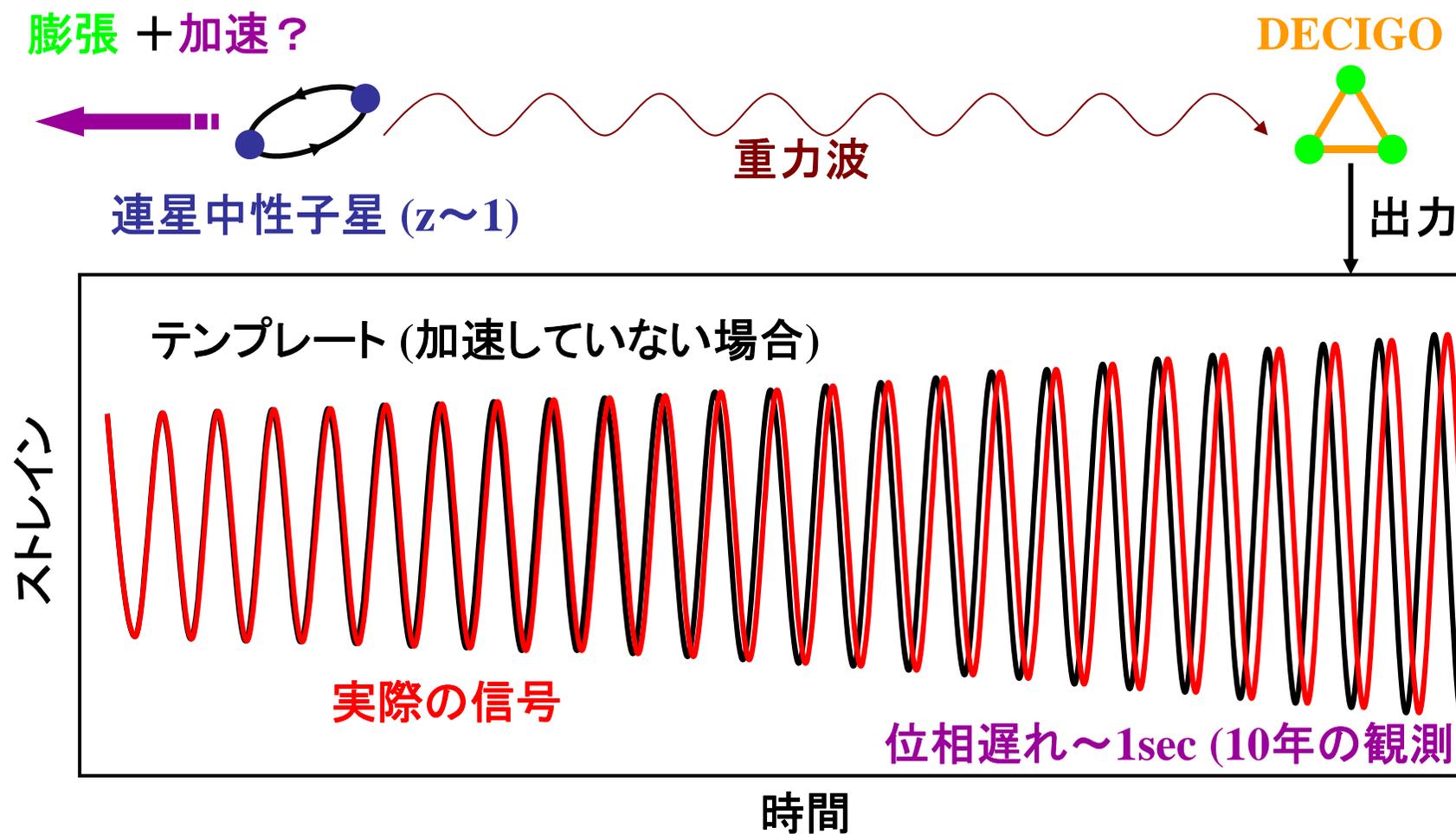
干渉計3台で
1クラスター



軌道とコンステレーション(案)



宇宙の膨張加速度の直接計測

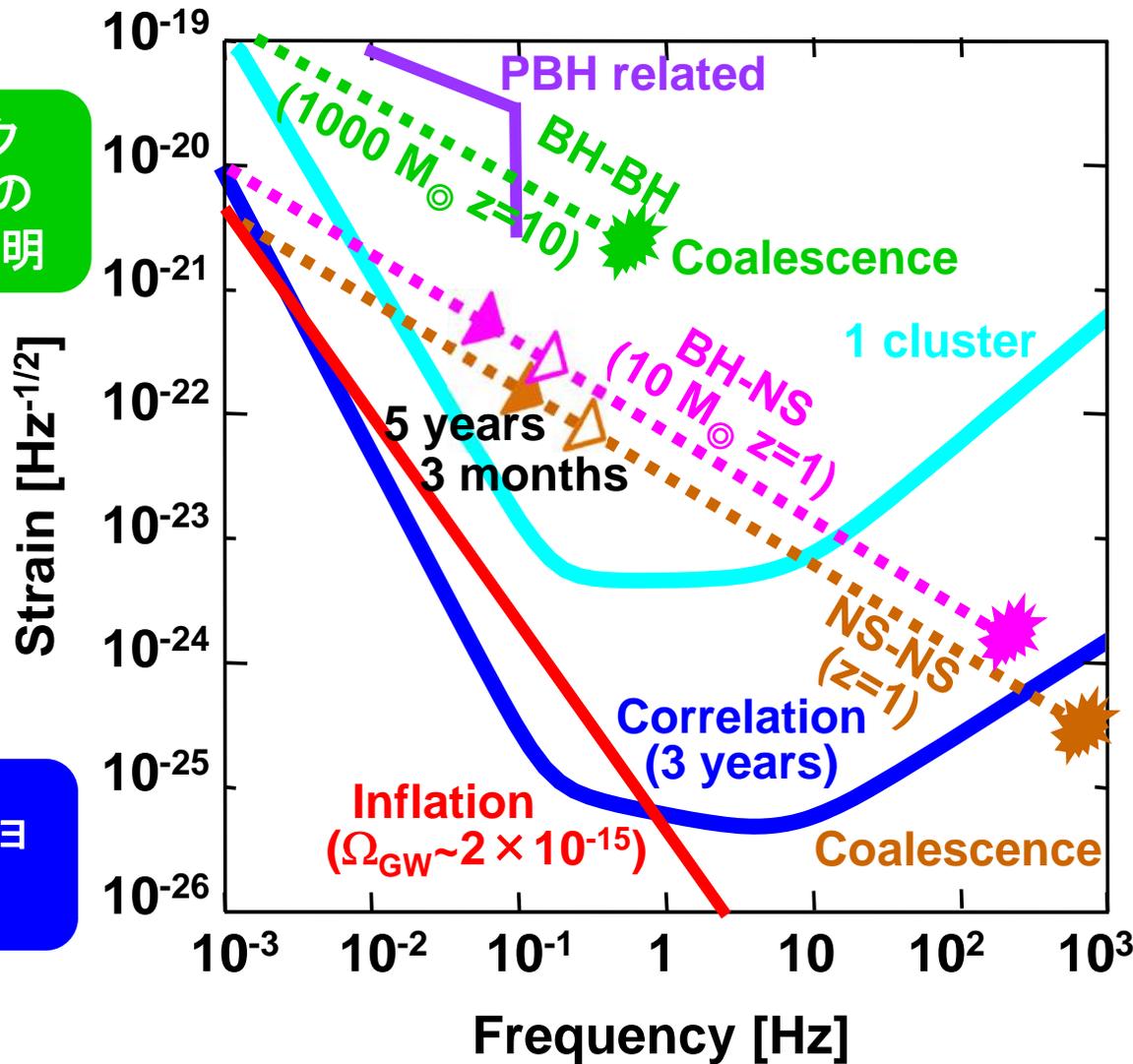


Seto, Kawamura, Nakamura, PRL 87, 221103 (2001)

DECIGOの目標感度と得られるサイエンス

巨大ブラックホール形成のメカニズム解明

インフレーションの検証



ダークマターの探索

Saito, Yokoyama 2009

一般相対性理論の検証

Yagi, Tanaka 2009

宇宙膨張加速度の計測
⇒ダークエネルギーの解明

Seto, Kawamura, Nakamura 2004

GS 幻 冬 舎 新 書

重力波とは何か

アインシュタインが奏でる
宇宙からのメロデー

川村 静児
Kawamura Seiji

427

ちょっと宣伝

重力波天文学の
夜明けが来たぜよ！



イラスト：
Sora