

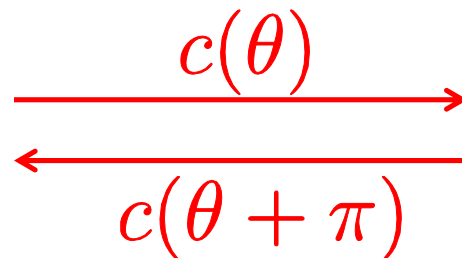
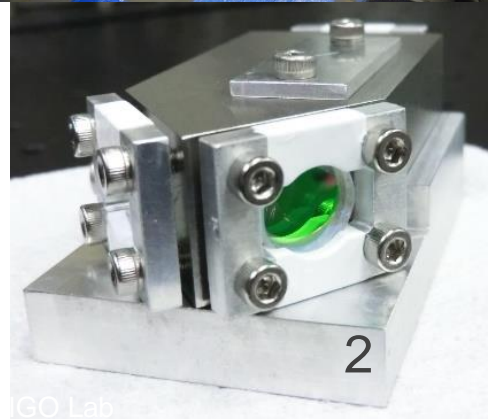
重力波観測の現状と展望

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

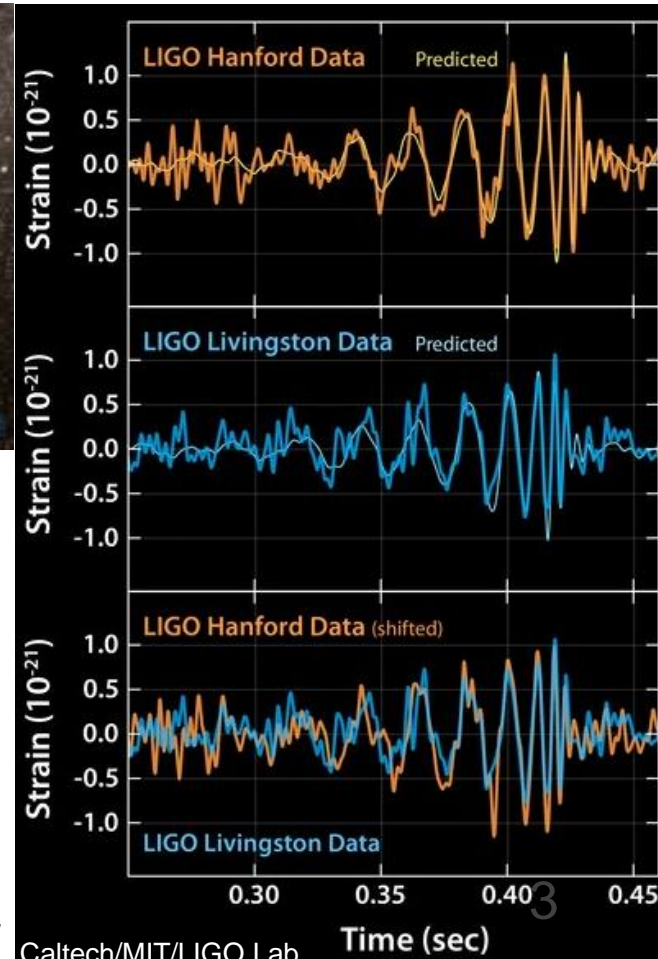
自己紹介

- 安東研究室 助教
- 重力波望遠鏡KAGRA
主干涉計の設計・開発
- 宇宙重力波望遠鏡DECIGO
- ローレンツ不変性の検証
非対称光リング共振器を用いた
片道光速の等方性検証
- 「干渉計を用いた基礎物理」
巨視的量子力学
重力逆二乗則の検証
ダークマター探索？



重力波、ついに初検出

- 2016年2月11日 初検出を発表(GW150914)
 - 2台のAdvanced LIGOでほぼ同時に検出
 - **ブラックホール連星の合体からの重力波**



Hanford
Observatory



PRL 116, 061102 (2016)
<https://www.ligo.caltech.edu/>

Caltech/MIT/LIGO Lab

Time (sec)

さらに続報

- 2016年6月15日 2つ目を発表(GW151226)
- 2017年6月1日 3つ目を発表(GW170104)
- **重力波天文学**の幕開け
*Once is chance, twice is coincidence,
thrice is a pattern.*



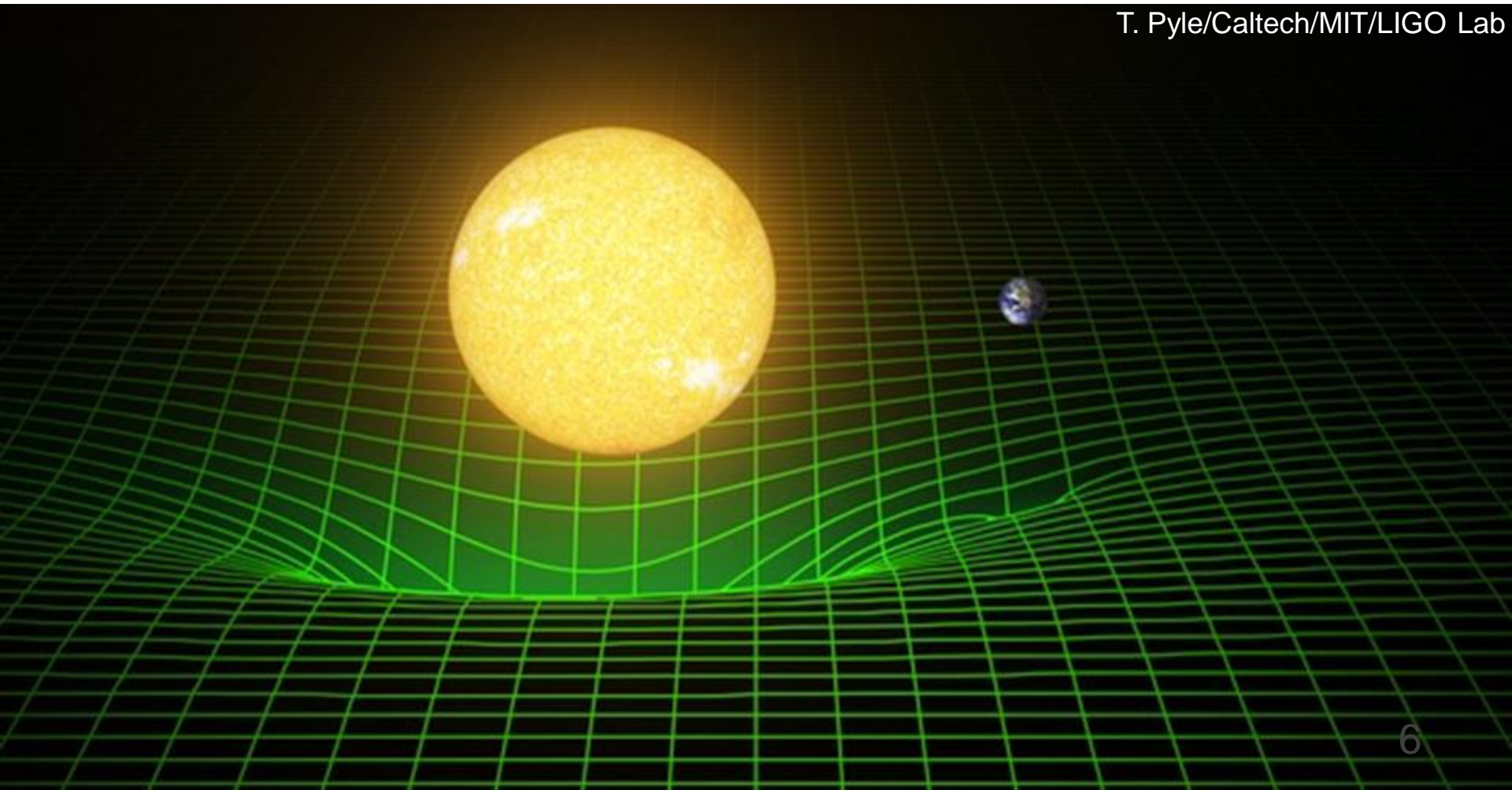
目次

- **重力波とは**
重力波の性質、重力波源、検出の原理
- **LIGOによる重力波の初検出**
意義、ブラックホールについてわかったこと、
わからなかったこと
今後の展望、重力波の国際観測ネットワーク
- **岐阜県神岡で建設中のKAGRAの紹介**
KAGRA独自の技術: 低温と地下建設
- **重力波望遠鏡の将来計画**
大型化、低温、地下建設

一般相対性理論における重力

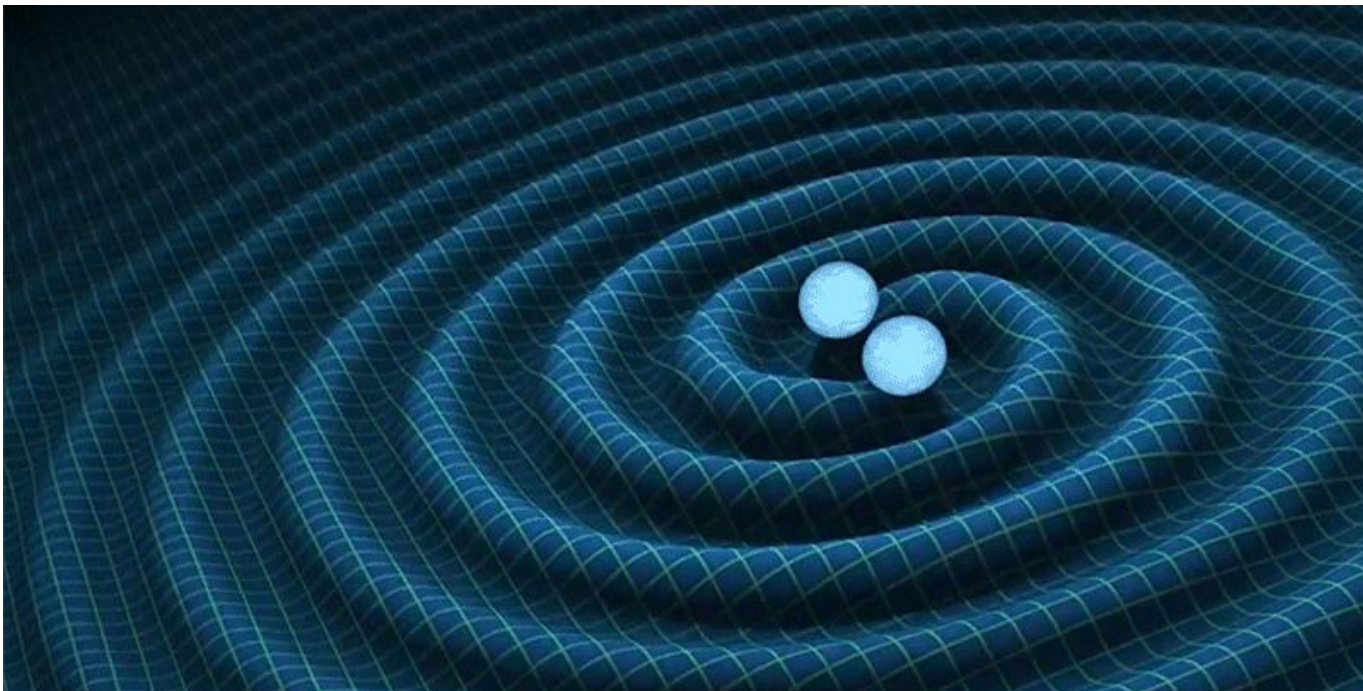
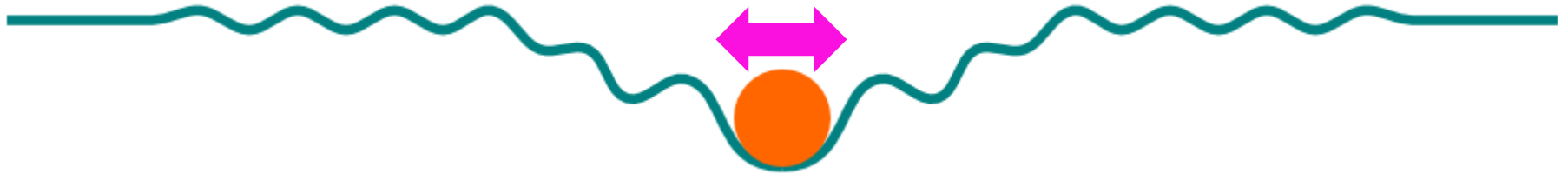
- 物体があると時空が歪む
- 時空の歪みが物体の運動に影響 →これが重力

T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab



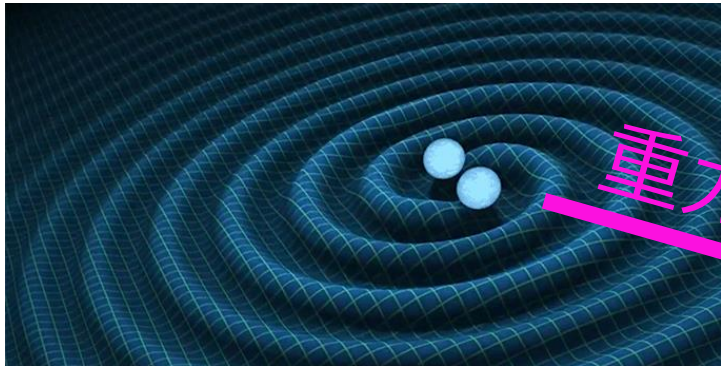
重力波

- 物体の運動や形状の変化により時空の歪みが変わり、光の速さで伝搬 → 重力波



重力波の特徴

- 光速で伝搬
- 四重極放射、2つの偏極(+モードとxモード)
- 透過性が高い ↔ 相互作用が弱い

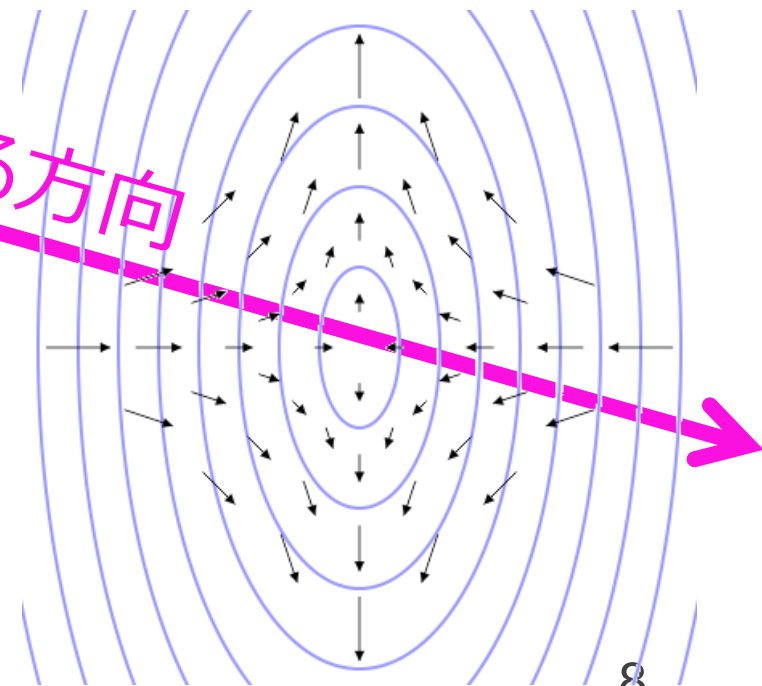


重力波の伝わる方向

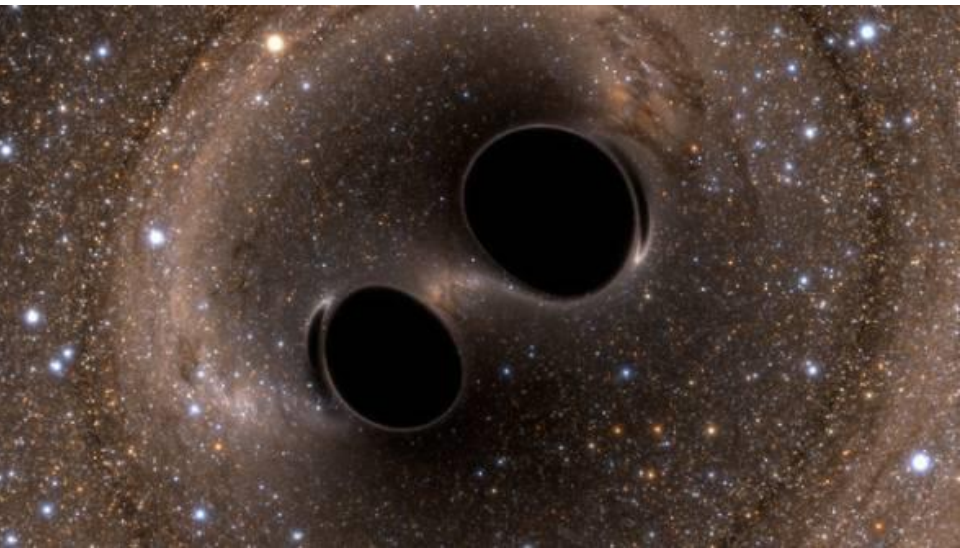
- 質量と加速度が大きいほど大きな振幅の重力波

- 重力波の振幅

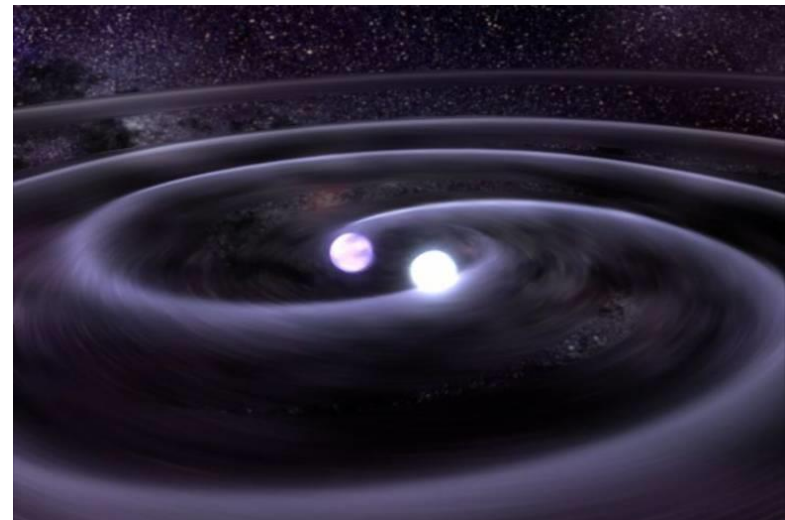
距離の変化量 $h = \frac{\delta L}{L}$



重力波源となり得る天体現象



ブラックホール連星

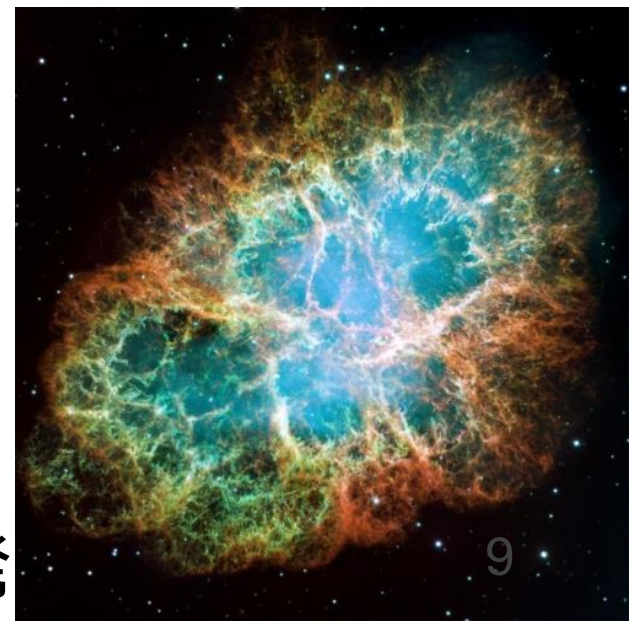


中性子星連星



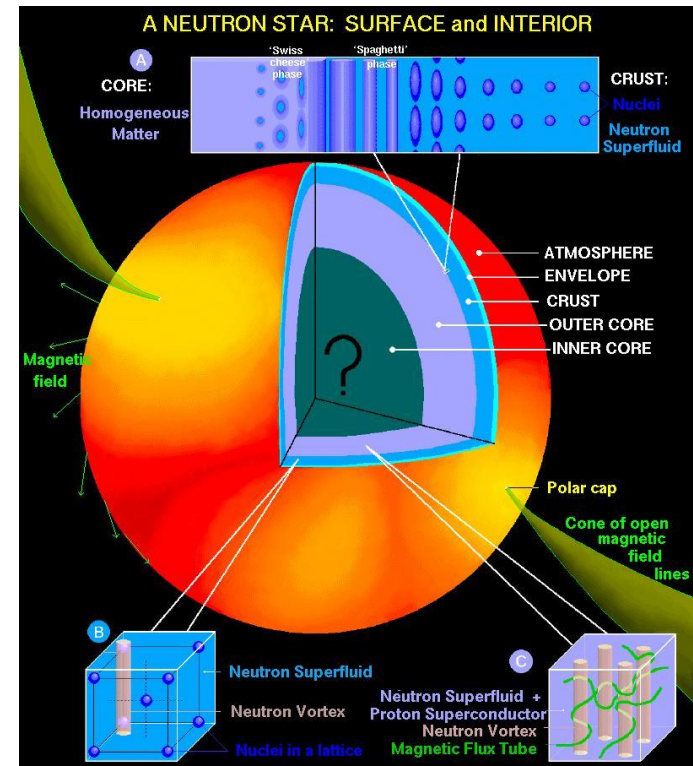
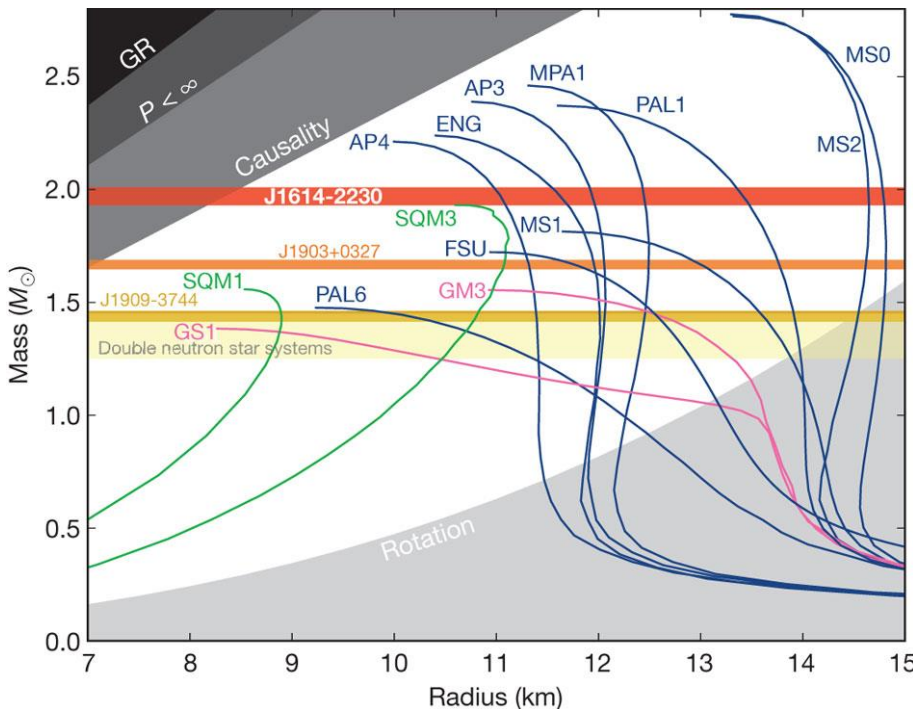
非軸対称な
回転中性子星

超新星爆発



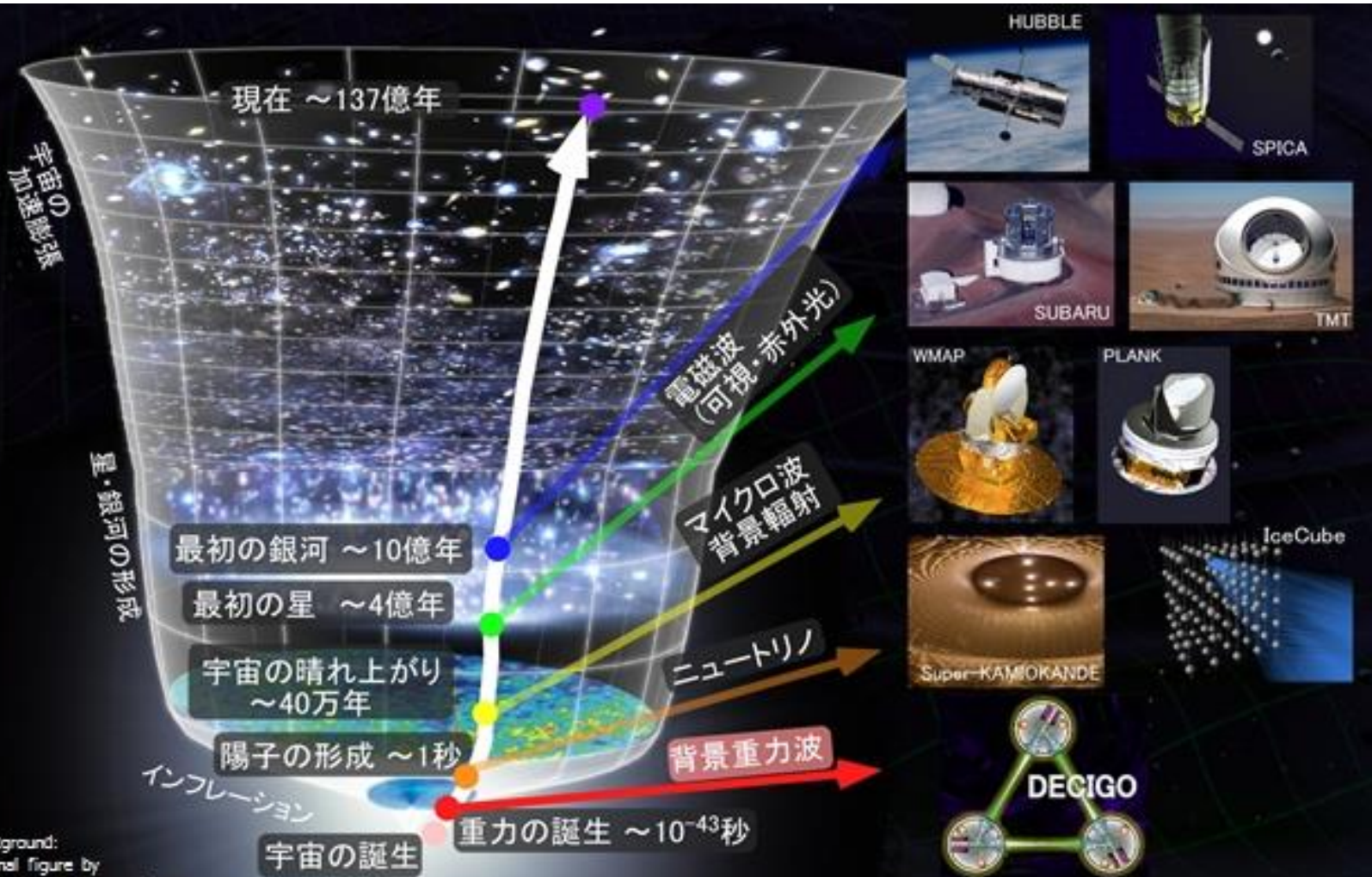
重力波で何がわかる？

- **星の中**を探ることができる
重力波の高い透過力
中性子星の状態方程式
- **電磁波などで見ることができない天体**を観測可能
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？



背景重力波

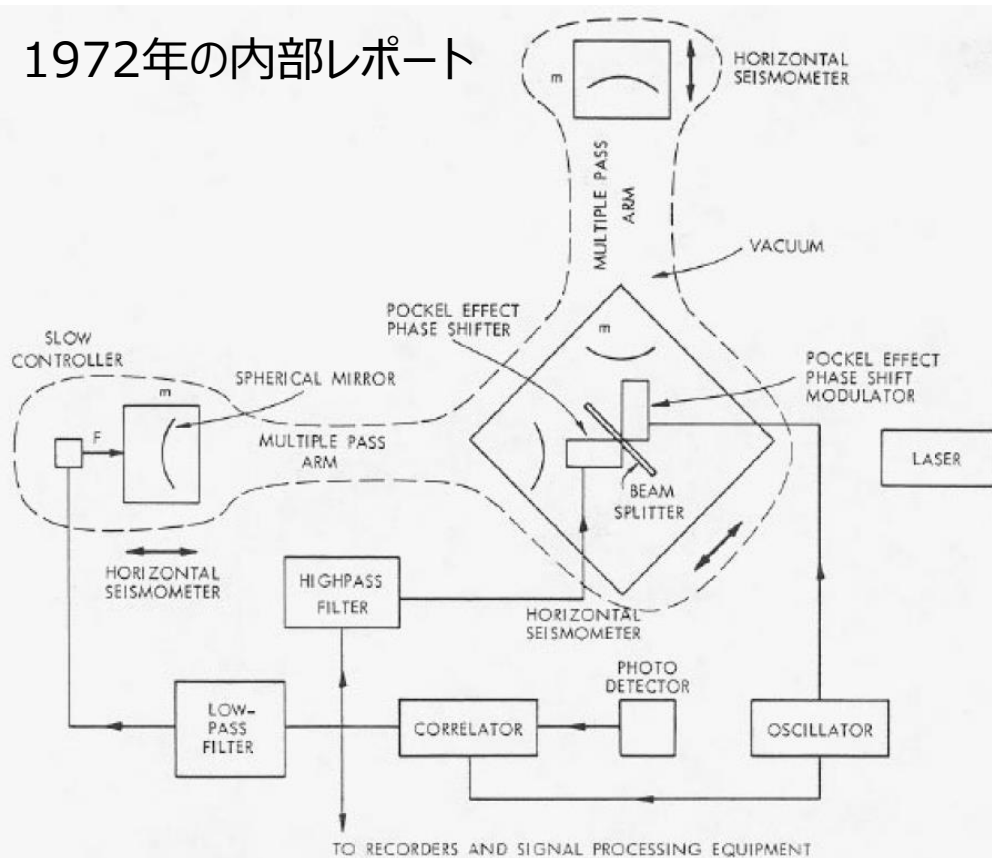
- 宇宙論的起源の重力波(インフレーション、相転移)
宇宙誕生直後に迫る



重力波の直接検出の方法

- レーザ干渉計を使う方法が主流
- 1960年代、Rai Weissがマサチューセッツ工科大学の一般相対性理論の授業の中で思いつく

1972年の内部レポート



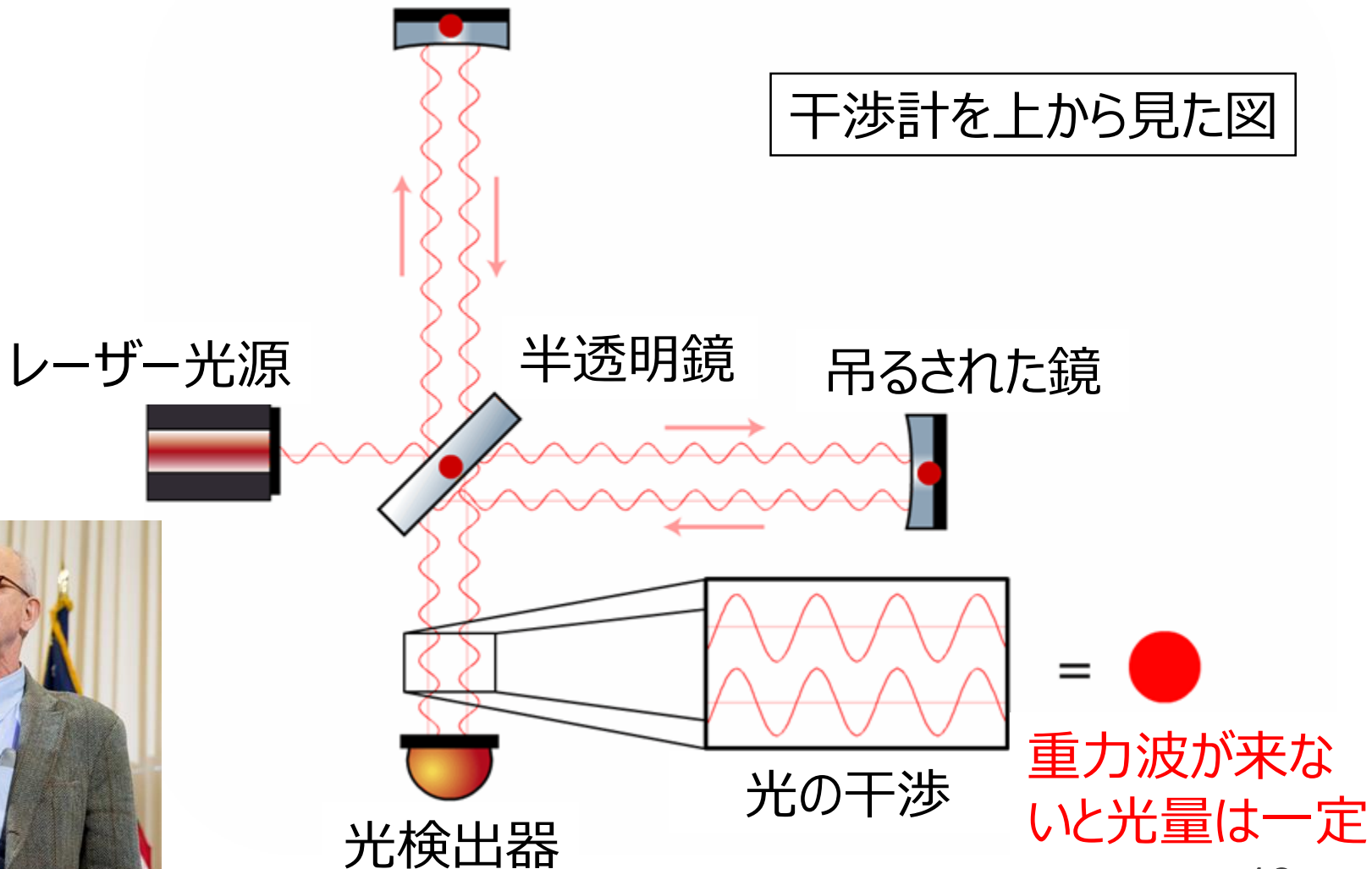
LIGO-P720002

Fig. V-20. Proposed antenna.



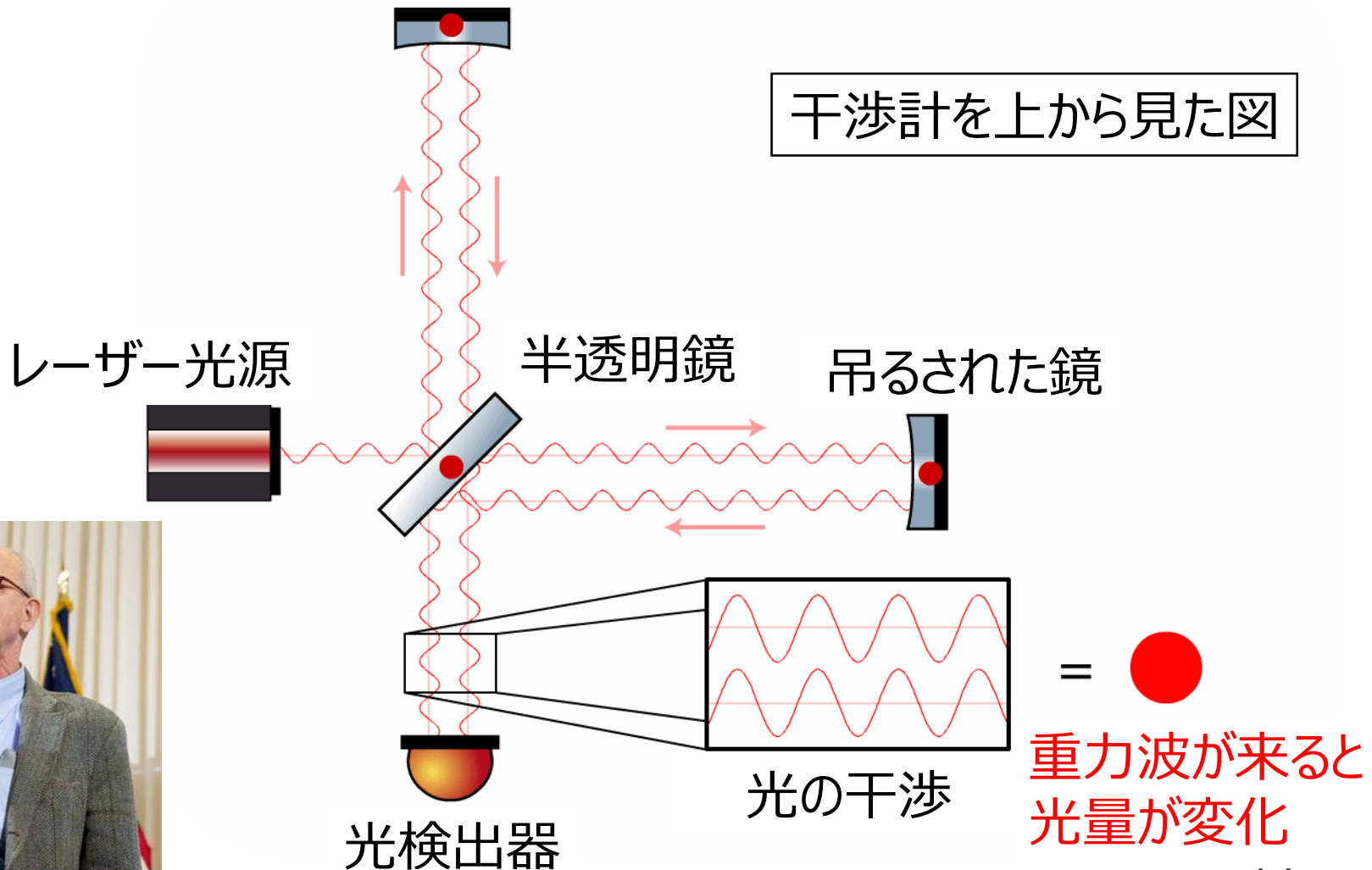
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



重力波直接検出までの歴史

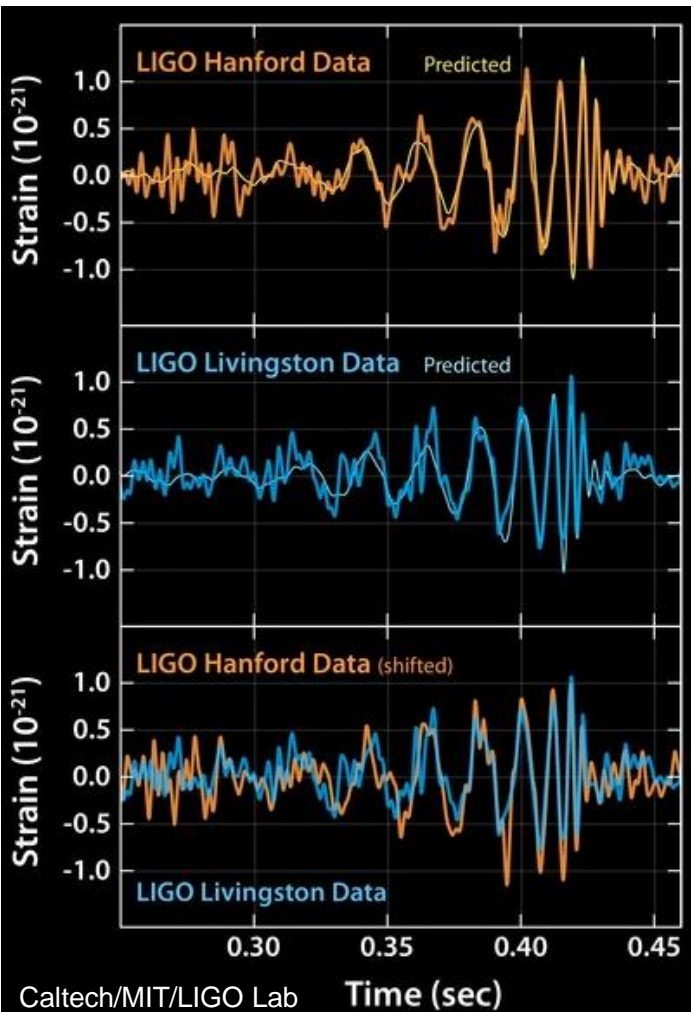
- 1916年 Einsteinが重力波を**予言**
- 1960年代 Weissが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始
LIGO (アメリカ 4km)、TAMA300 (日本 300m)、
GEO600 (ドイツ 600m)、Virgo (イタリア 3km)
→ 重力波は**見つからず**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 Advanced LIGOが
初稼働
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表
**予言から100年、
提案から50年！**

初検出を発表するDavid Reitze

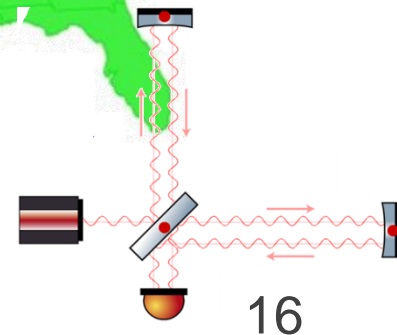


アメリカのLIGOによる初検出

- 3000 km離れた2台の望遠鏡でほぼ同時(7 msec)に同じ波形を検出

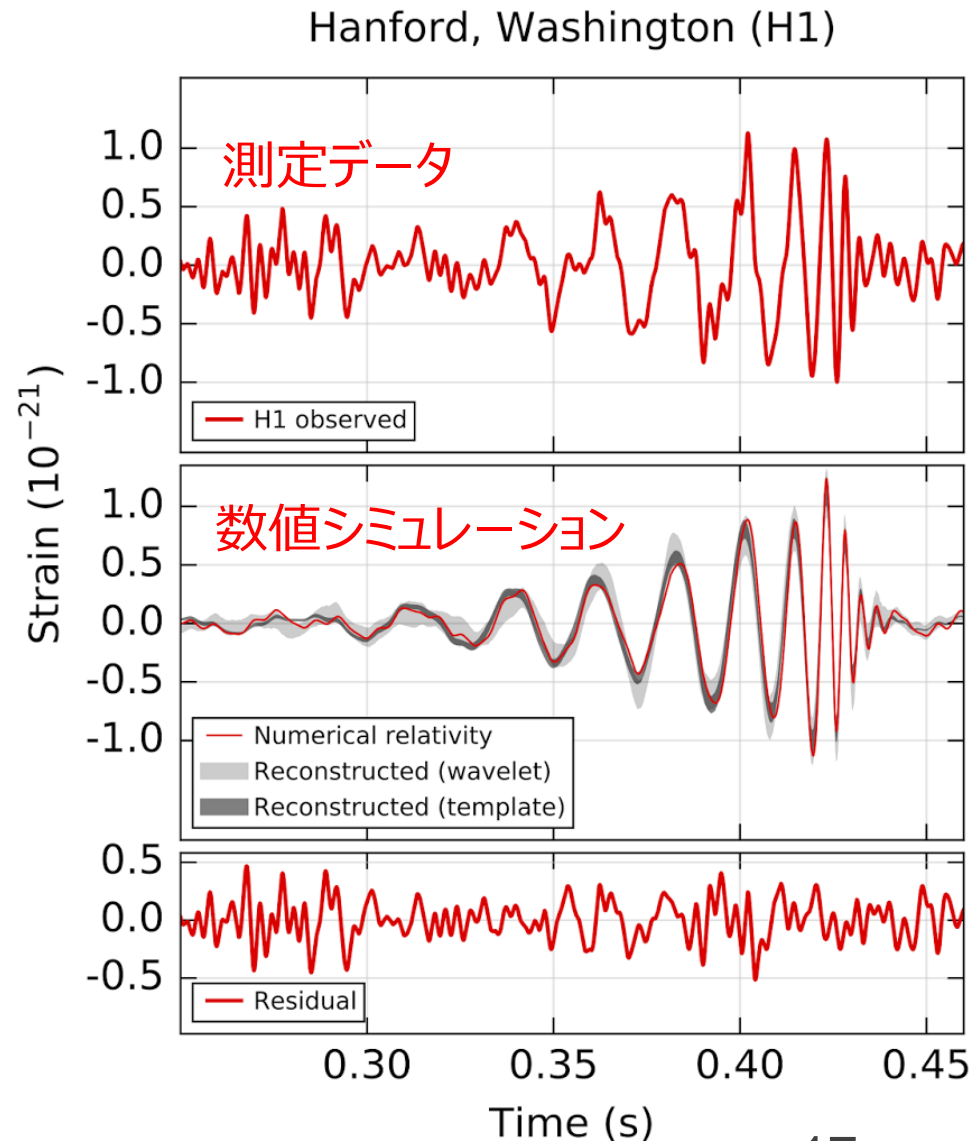


ハンフォード観測所



重力波の波形

- 数値相対論で精度良く計算することができる
- **Matched filter**によるSNRの最大化
- 1例目から見てわかる教科書のような波形
- **強い重力場**での一般相対性理論の検証

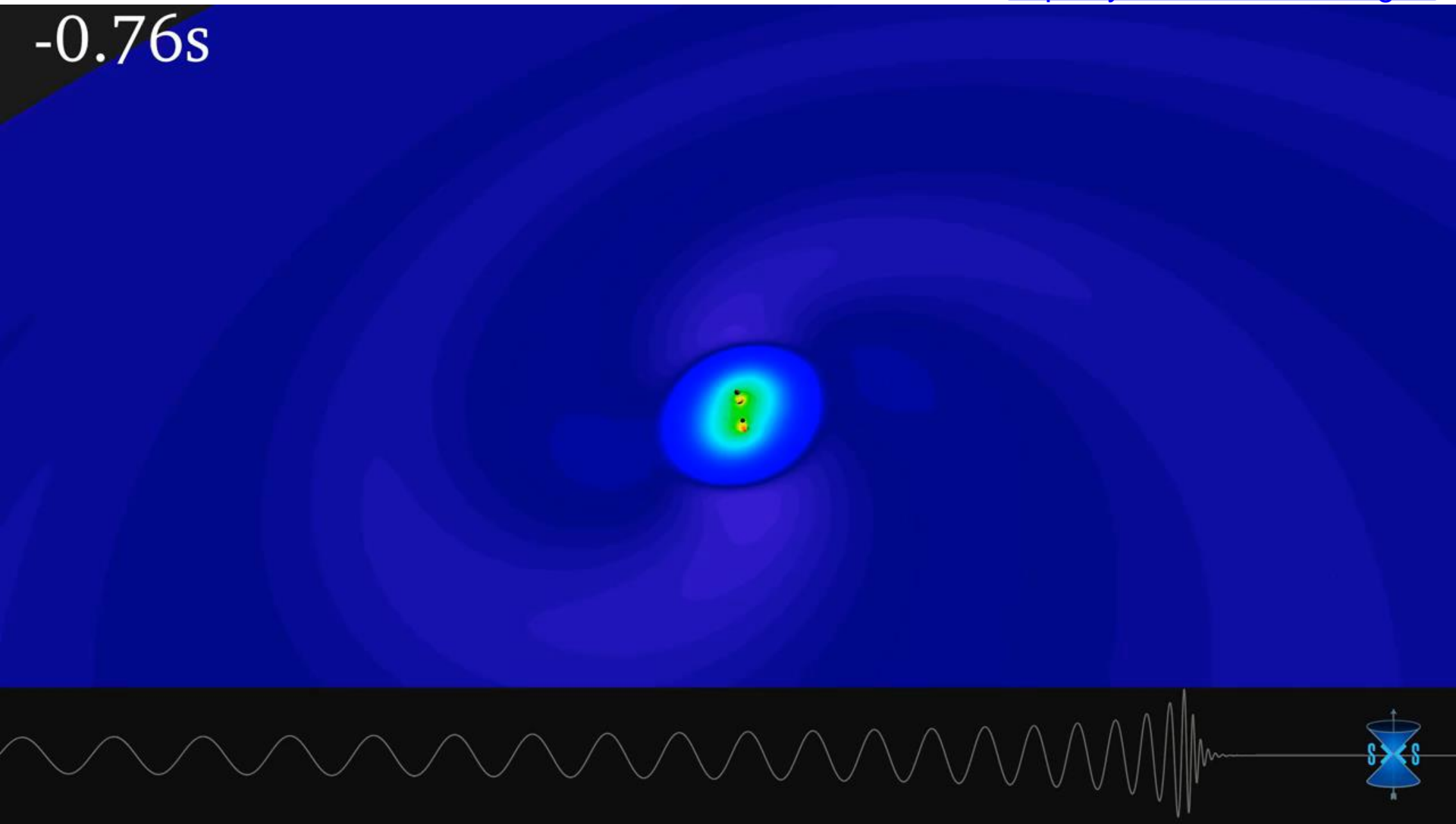


コンピュータシミュレーション

- 数値相対論、計算機の発展も初検出に大きく寄与

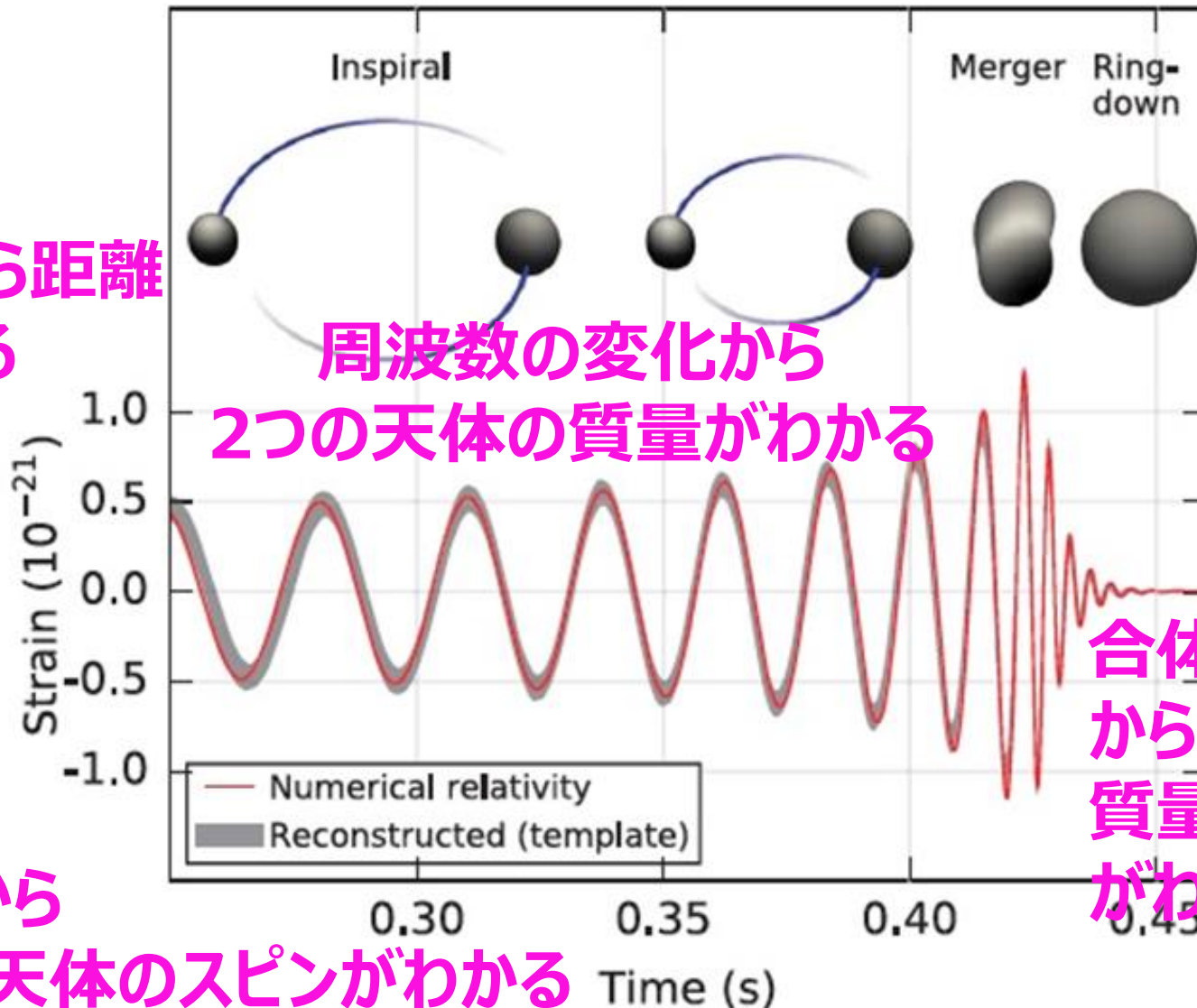
<https://youtu.be/c-2XluNFgD0>

-0.76s



重力波形から何がわかるか？

- 天体の質量、スピンと距離がわかる



振幅から距離
がわかる

周波数の変化から
2つの天体の質量がわかる

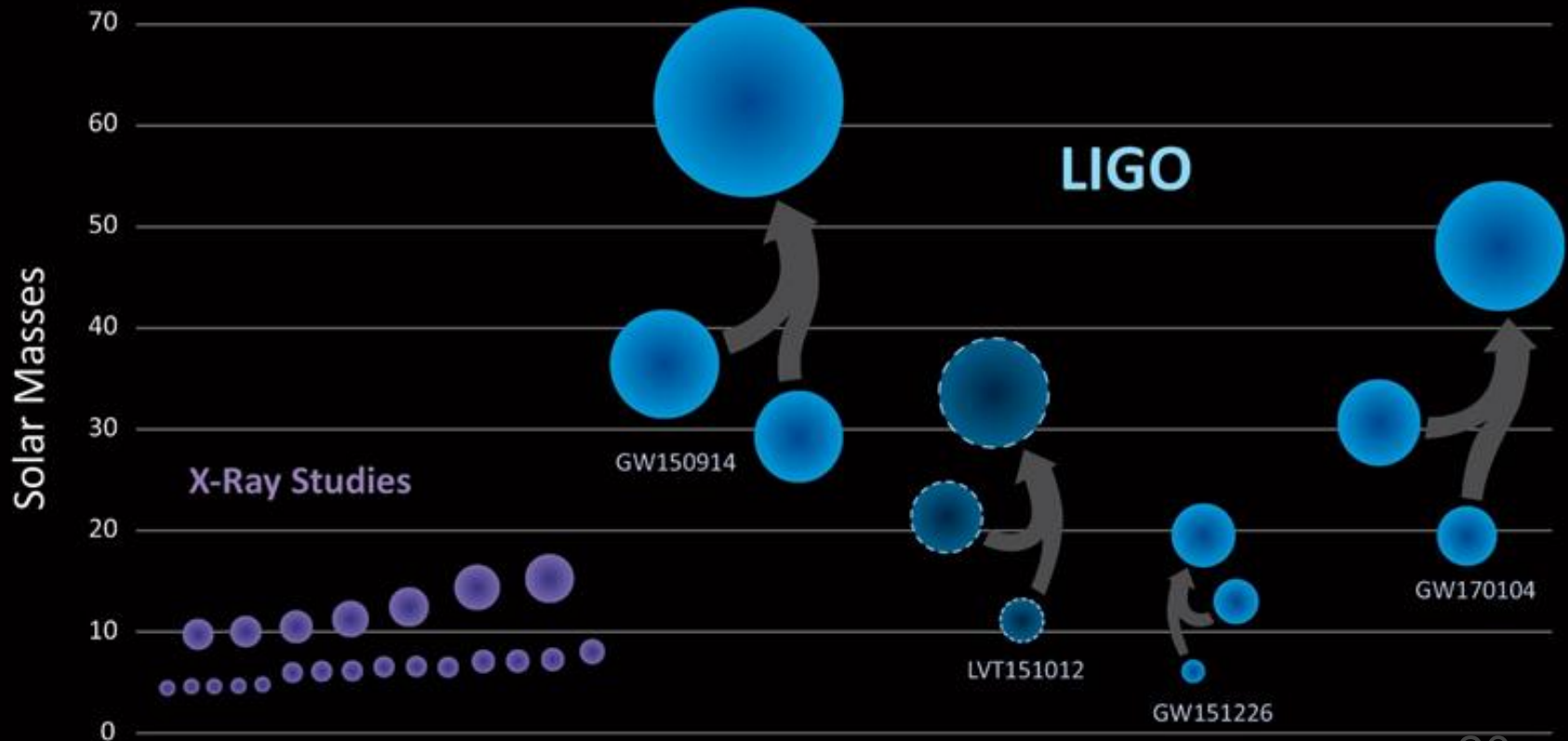
合体後の波形
から合体後の
質量とスピン
がわかる

変調から
2つの天体のスピンがわかる

ブラックホールの質量

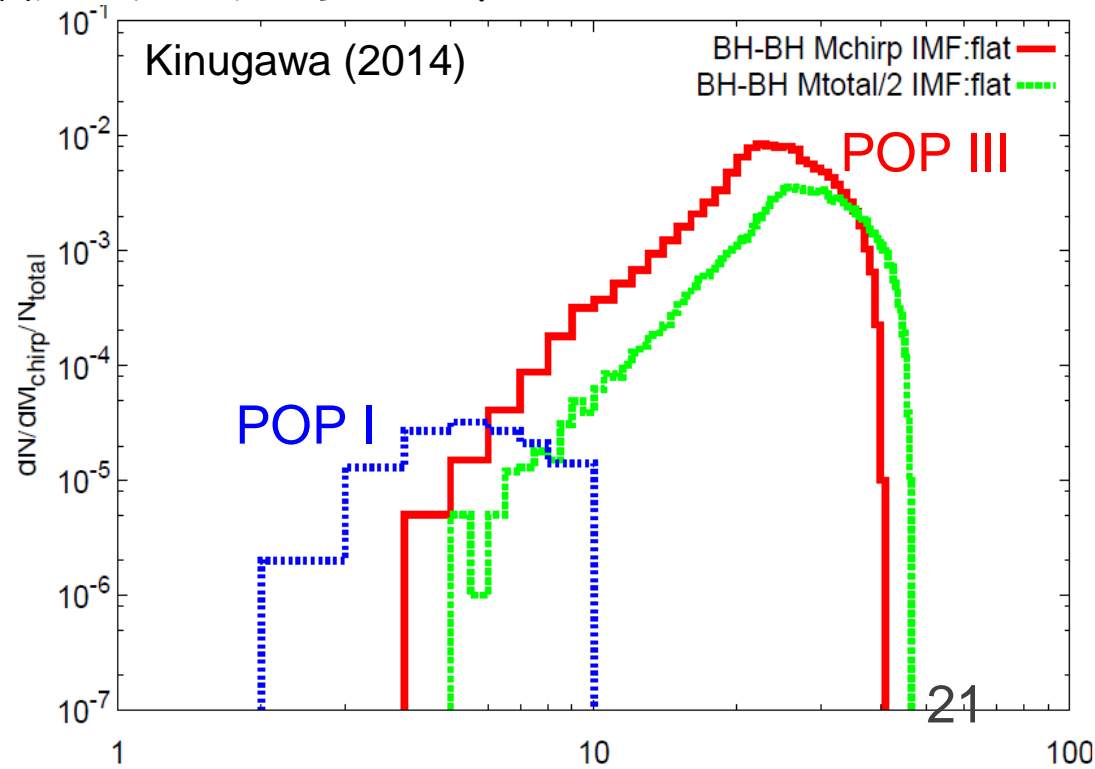
- これまで見つかった恒星質量BHより**重い**

Black Holes of Known Mass



ブラックホール形成過程の謎

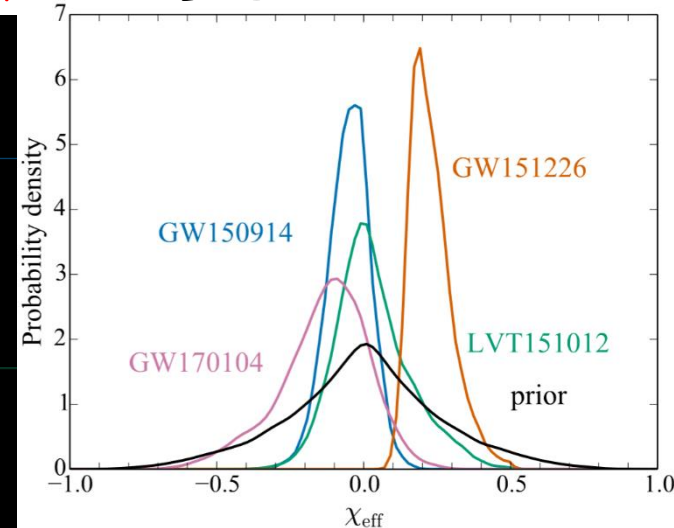
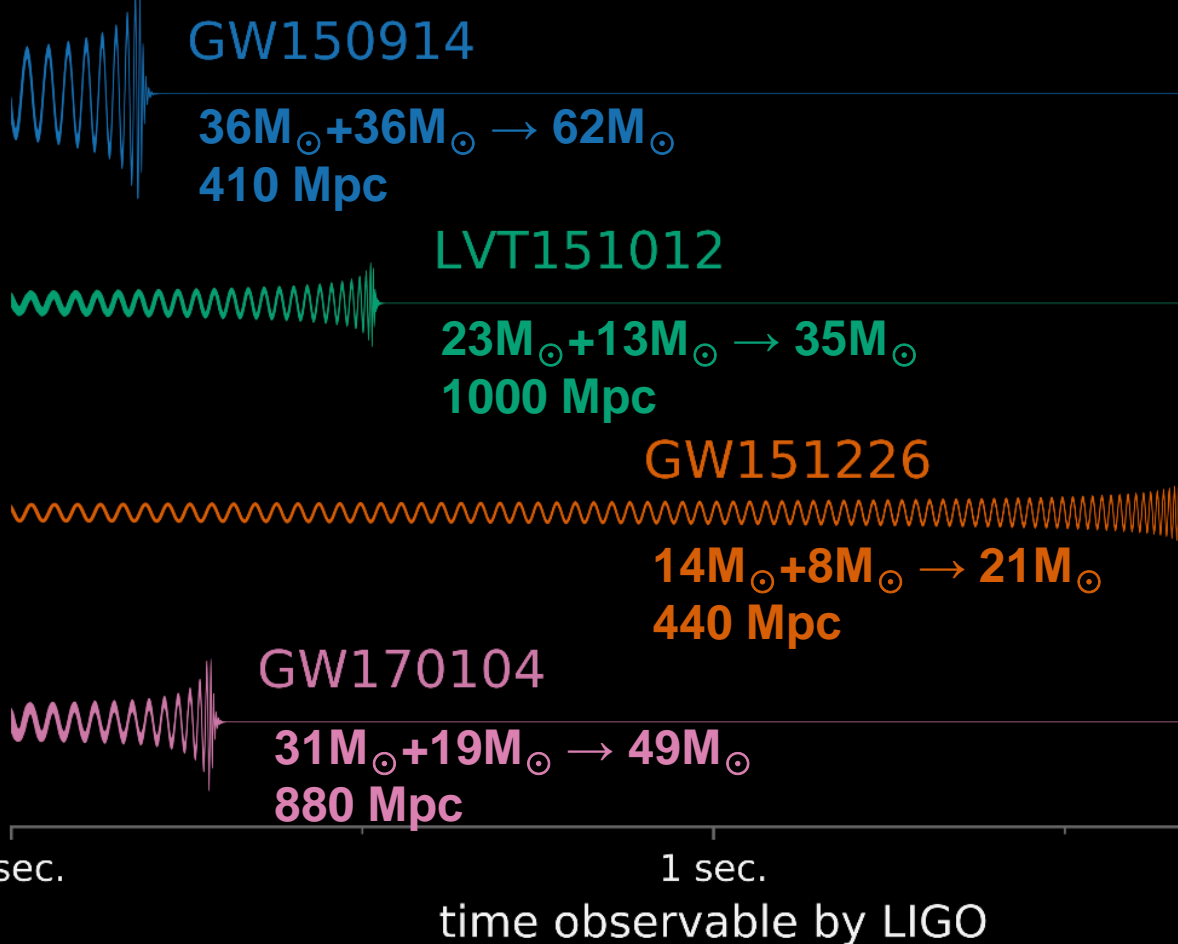
- 超新星爆発、中性子星連星合体では10太陽質量程度以下のBHしかできない
大質量天体は質量も大きく失う
(低金属量または強磁場下では質量損失少ない)
- 重い恒星質量BHの形成シナリオ案
 - 球状星団
 - 初代星(POP III)
 - 原始BH
 - などなど
- 合体頻度や質量分布、スピンなどの統計からわかってくる



GW170104が新しかったこと

- $z=0.2$ と遠かった
- スピンが揃っていなかった可能性がある

<http://www.ligo.org/detections/GW170104.php>



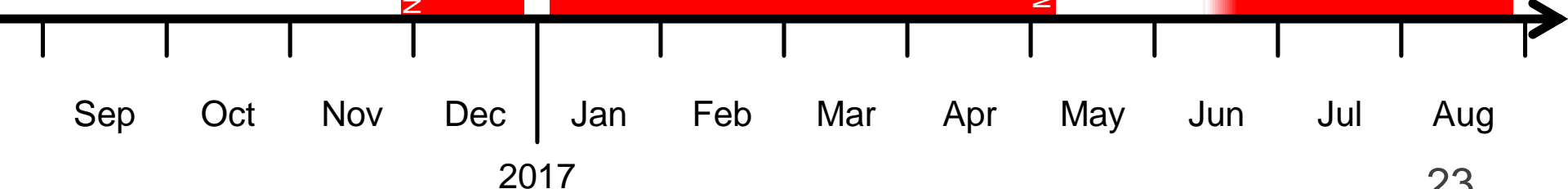
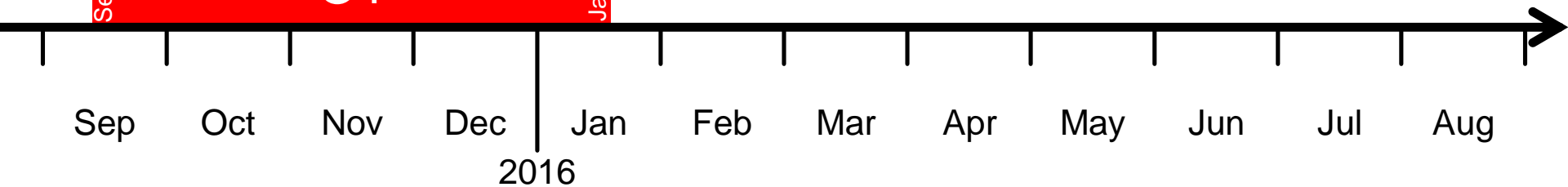
質量の精度は
10-20%程度
距離の精度は
40-50%程度

今後の観測スケジュール

- **Advanced Virgo**が7月頭からO2bに参加予定？
- O3はその1年後？



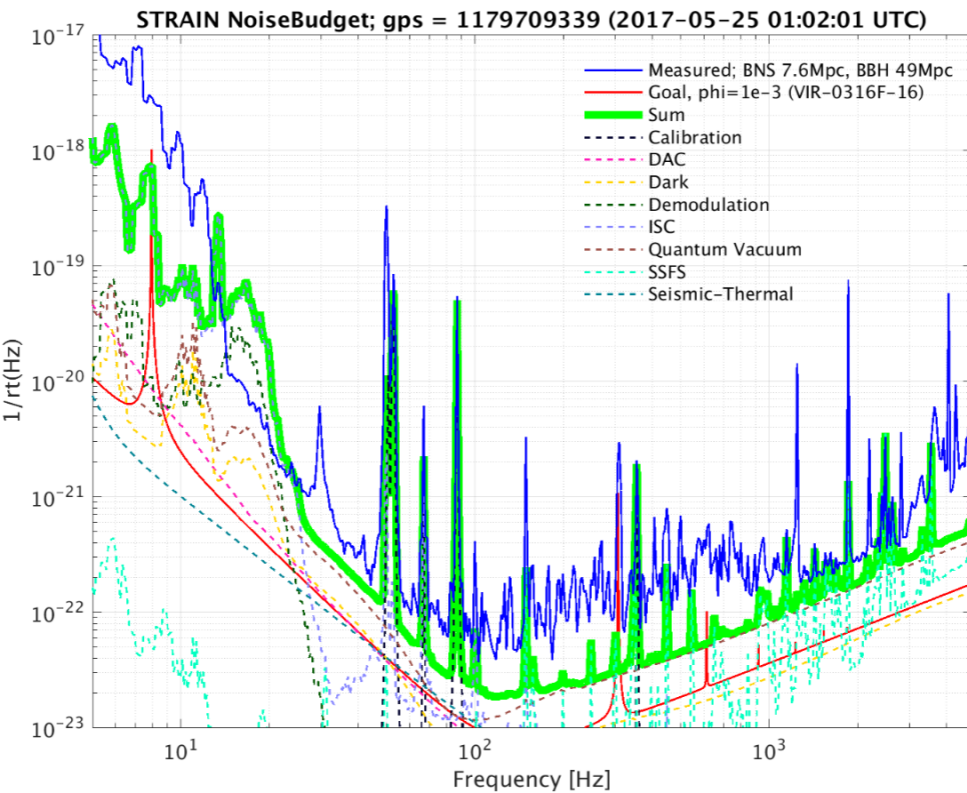
最新の推定合体頻度
 $12-213 \text{ Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$
(質量分布の仮定が最大の誤差要因)



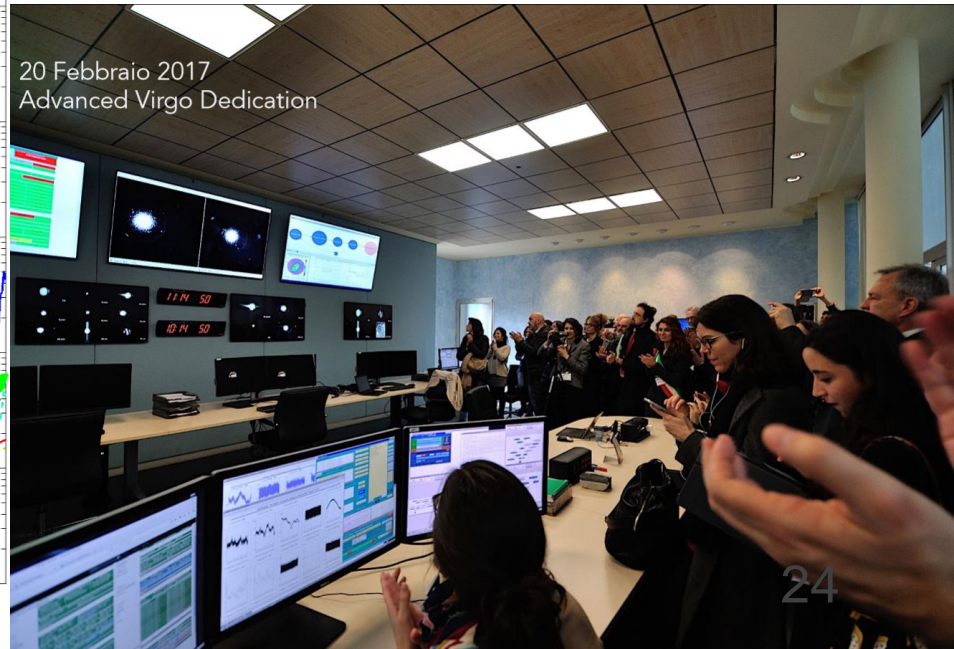
Advanced Virgoの現状

- 2016年8月 導入・統合作業完了
- 2017年3月 安定な干渉計制御達成
- 感度は現在のAdvanced LIGOより1桁悪いが日々更新中 (BNS ~ 8 Mpc)

M. Was, VIR-0417A-17



G. Losurdo, VIR-0415A-17



世界の重力波観測ネットワーク

- 各国で建設・改良が進行中

GEO-HF
(稼働中)



Advanced LIGO
(O2もうすぐ再開)



Advanced Virgo
(O2への参加準備中)



Advanced LIGO



KAGRA
(建設中)

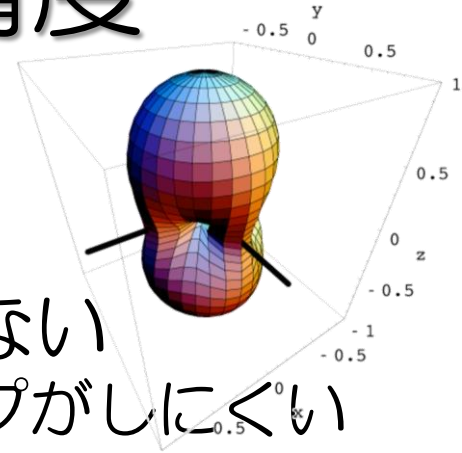


LIGO-India (原則承認)

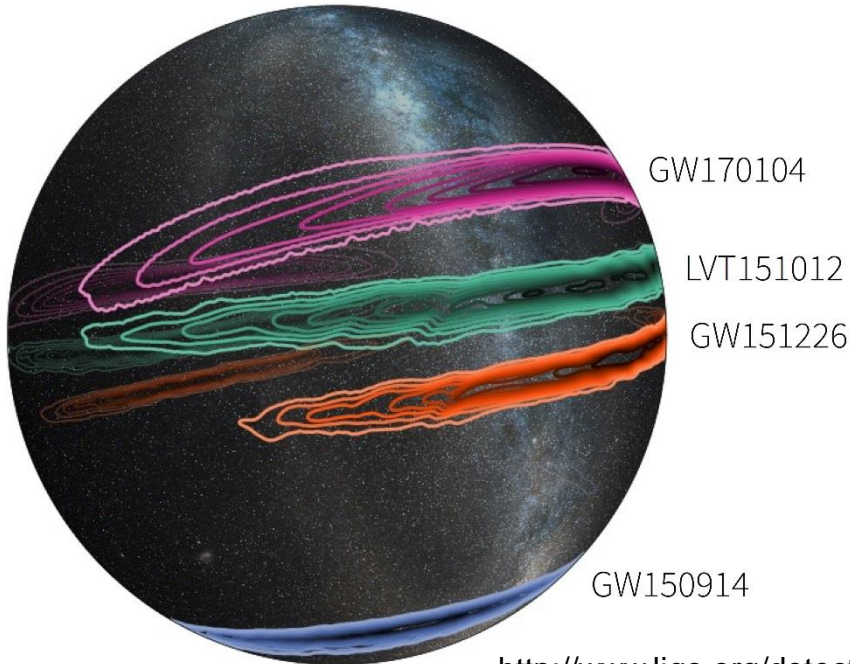


重力波源の方向決定精度

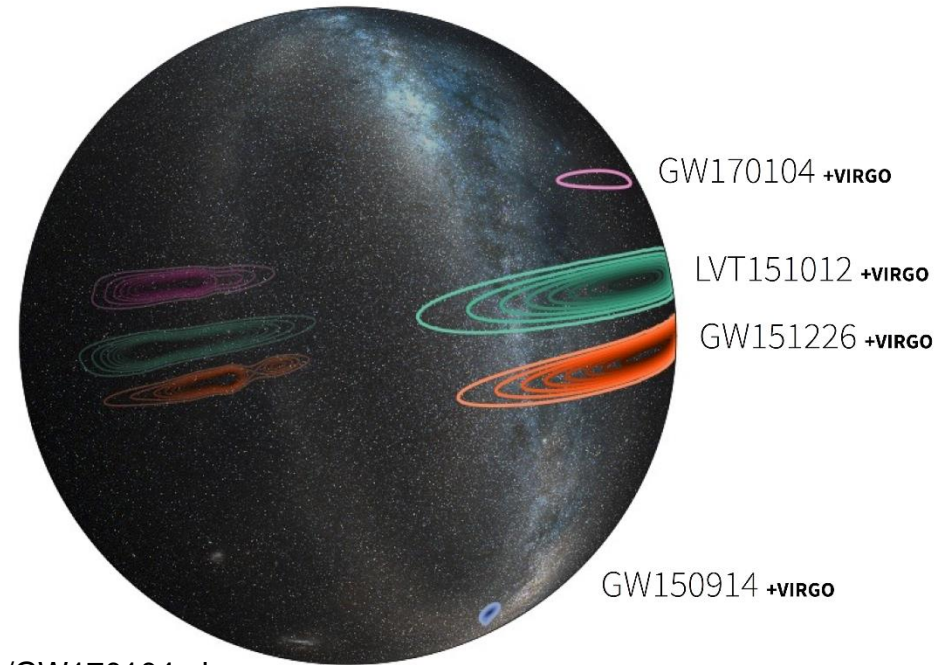
- 重力波検出器は**指向性が小さい**
- 現在のAdvanced LIGO 2台では **$O(100)$ deg²程度**しか方向決定ができない
電磁波/ニュートリノによるフォローアップがしにくい
- 最低でも**3台**の検出器が必要



Advanced LIGO 2台の場合



Advanced Virgoが加わった場合

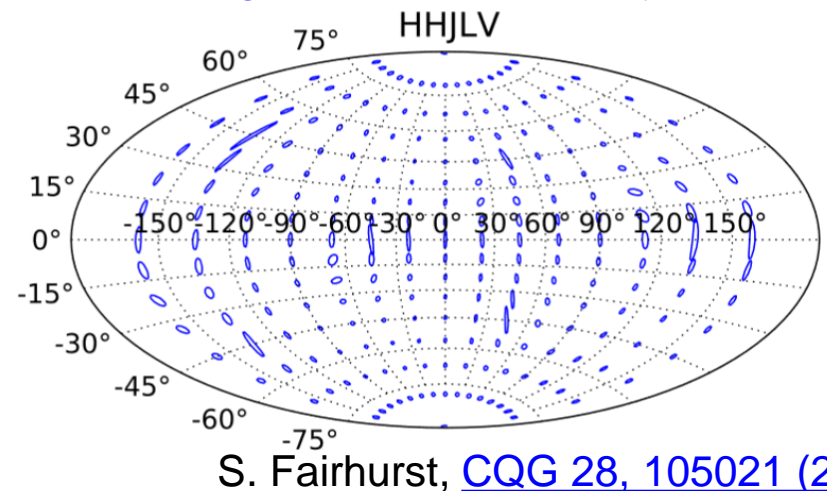
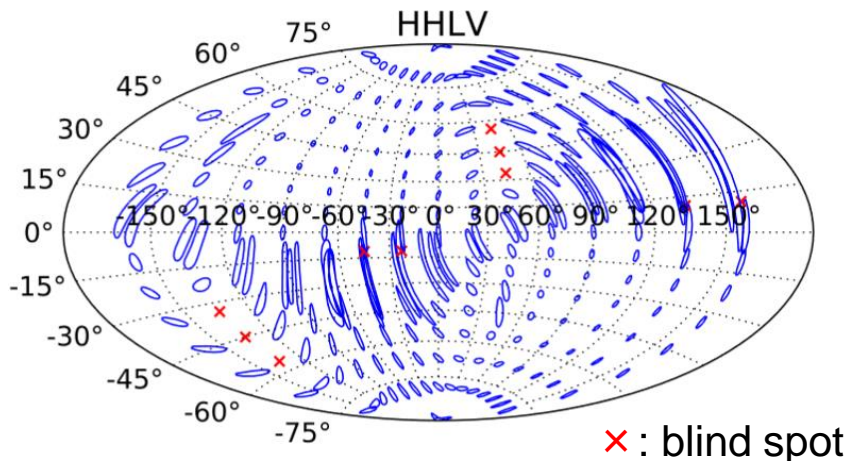


今後期待されること(~5年以内)

- Advanced Virgoの参加による**方向決定精度**の向上
- KAGRAなどの参加によるさらなる精度向上、**全天カバー率、稼働率**の拡大

(LHV 5-20 deg², 72% → LHVK <10 deg², 100%)

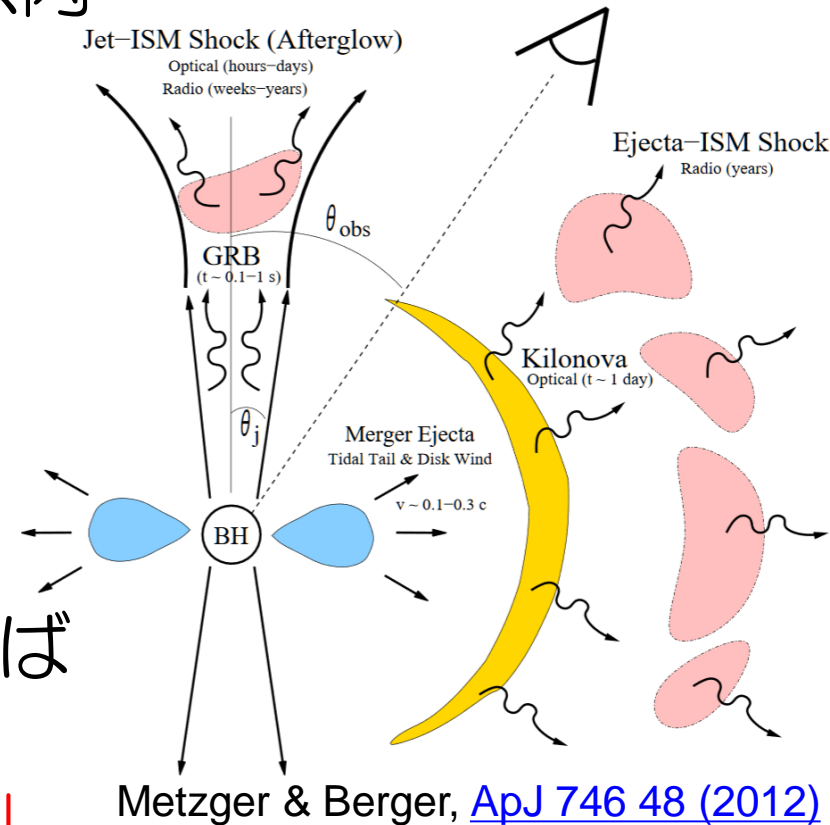
[Living Reviews in Relativity 19, 1 \(2016\)](#)



- **BH-NS**合体、**NS-NS**合体の初観測
中性子星の状態方程式、ハイペロンの存在
短いガンマ線バースト？
マルチメッセンジャー観測 (EM, ν)

重力波/電磁波/ニュートリノの競演

- **超新星爆発**のメカニズム解明
KAGRAでは~数100kpc以内
- **中性子星連星合体**
ガンマ線バースト?
重元素合成?
- **標準音源**としての重力波
重力波で距離がわかる
電磁波で母銀河がわかれば
赤方偏移がわかる
→ **宇宙膨張を直接観測**



A. Nishizawa+, [PRD 83, 084045 \(2011\)](#)
A. Nishizawa+, [PRD 85, 044047 \(2012\)](#)

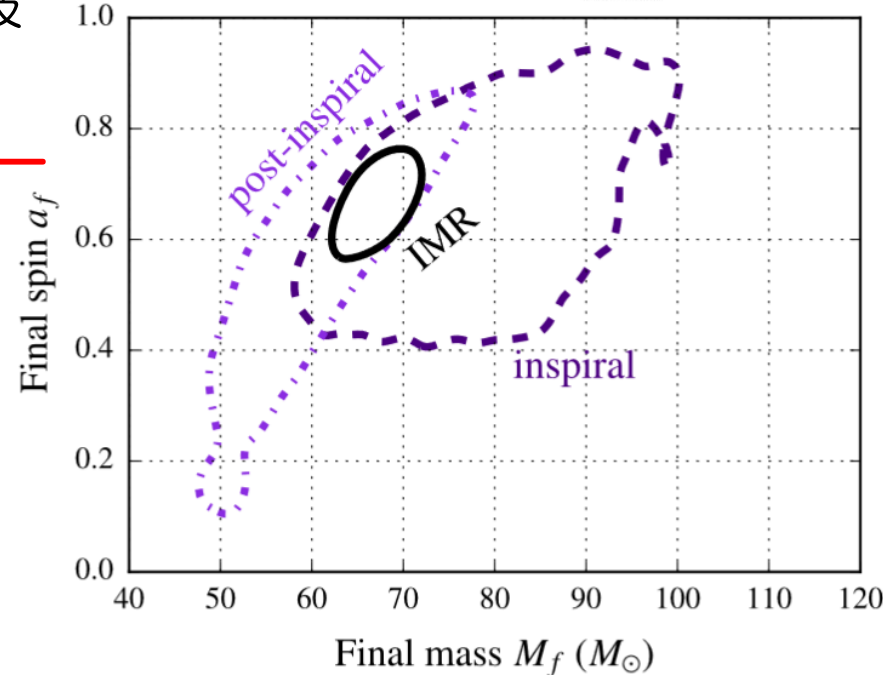
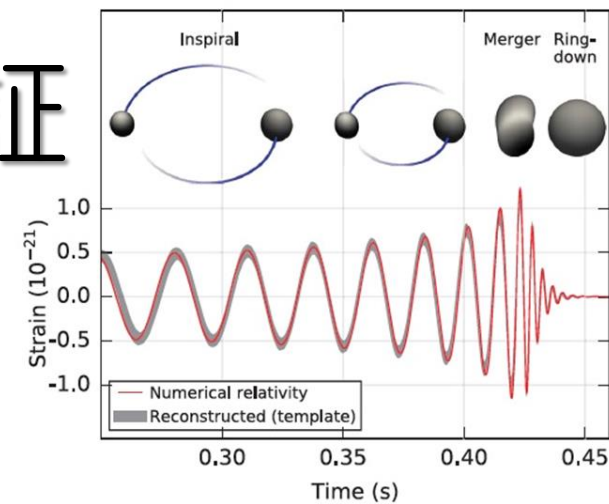
重力理論の検証

- Post-Newtonian展開の係数
- 合体前後の無矛盾性

ただし一般相対論の範囲内でも、kickがあるはずれる可能性あり(重力波の非等方的放射による反動)

- 準固有振動(QNM)、エコー
No-hair theoremの検証
(Kerr BHは質量とスピンのみ)
wormhole??
gravastar??

- 重力波の分散
Lorentz不変性の検証
重力子の質量

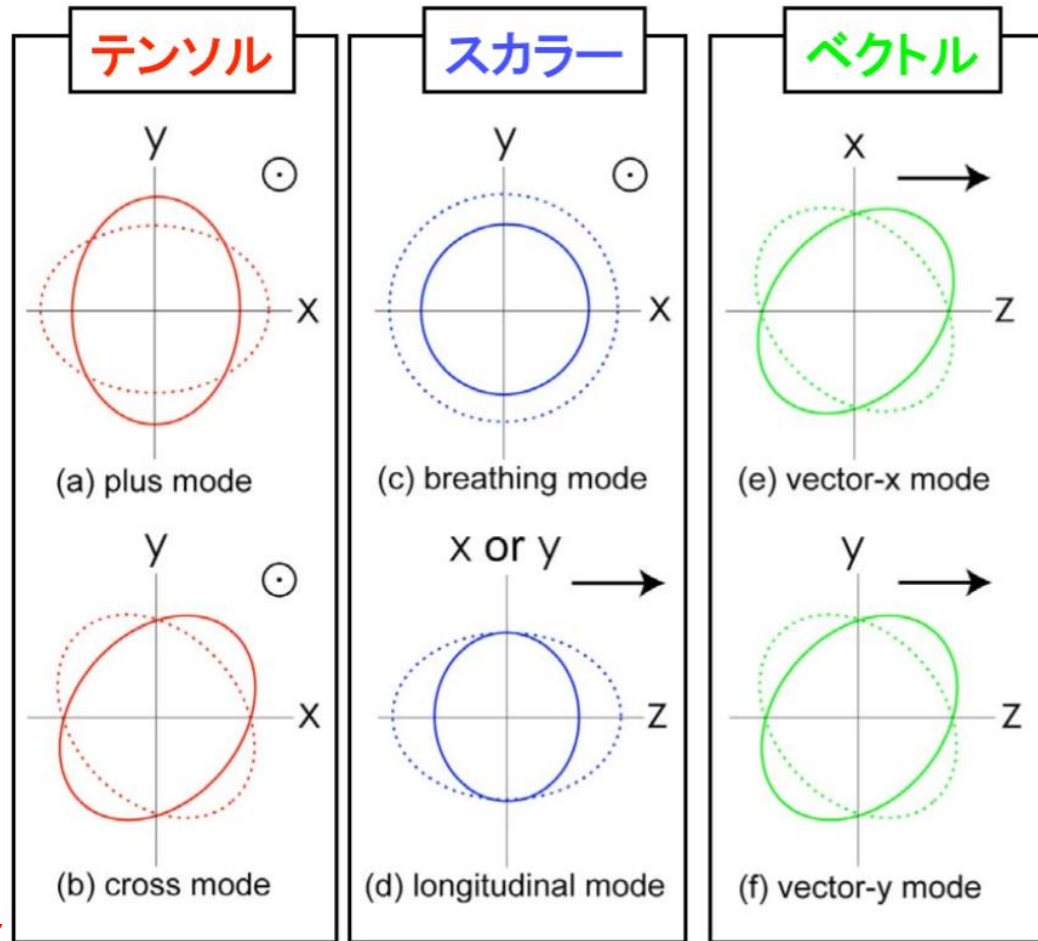


[PRL 116, 221101 \(2016\)](#)

重力理論の検証

- 重力波の偏極モード分離には3台以上の検出器が必要

A. Nishizawa+, [PRD 79, 082002 \(2009\)](#)



一般相対性理論

4次元時空での修正重力理論
(Brans-Dicke理論、 $f(R)$ 重力理論など)

余剰次元理論

KAGRA建設中

- 大型**低温**重力波望遠鏡 (愛称: かぐら)
- 岐阜県の神岡鉱山**地下**に建設中
- 日本を中心に国内外60以上の大学・研究機関、200人以上の参加
- **地下建設と低温が大きな特徴**



プロジェクト代表:
梶田隆章



などなど

茂住オフィス

- 東京から北陸新幹線で2時間、
富山駅から車で南へ1時間くらい



東京大学宇宙線研究所
重力波観測研究施設

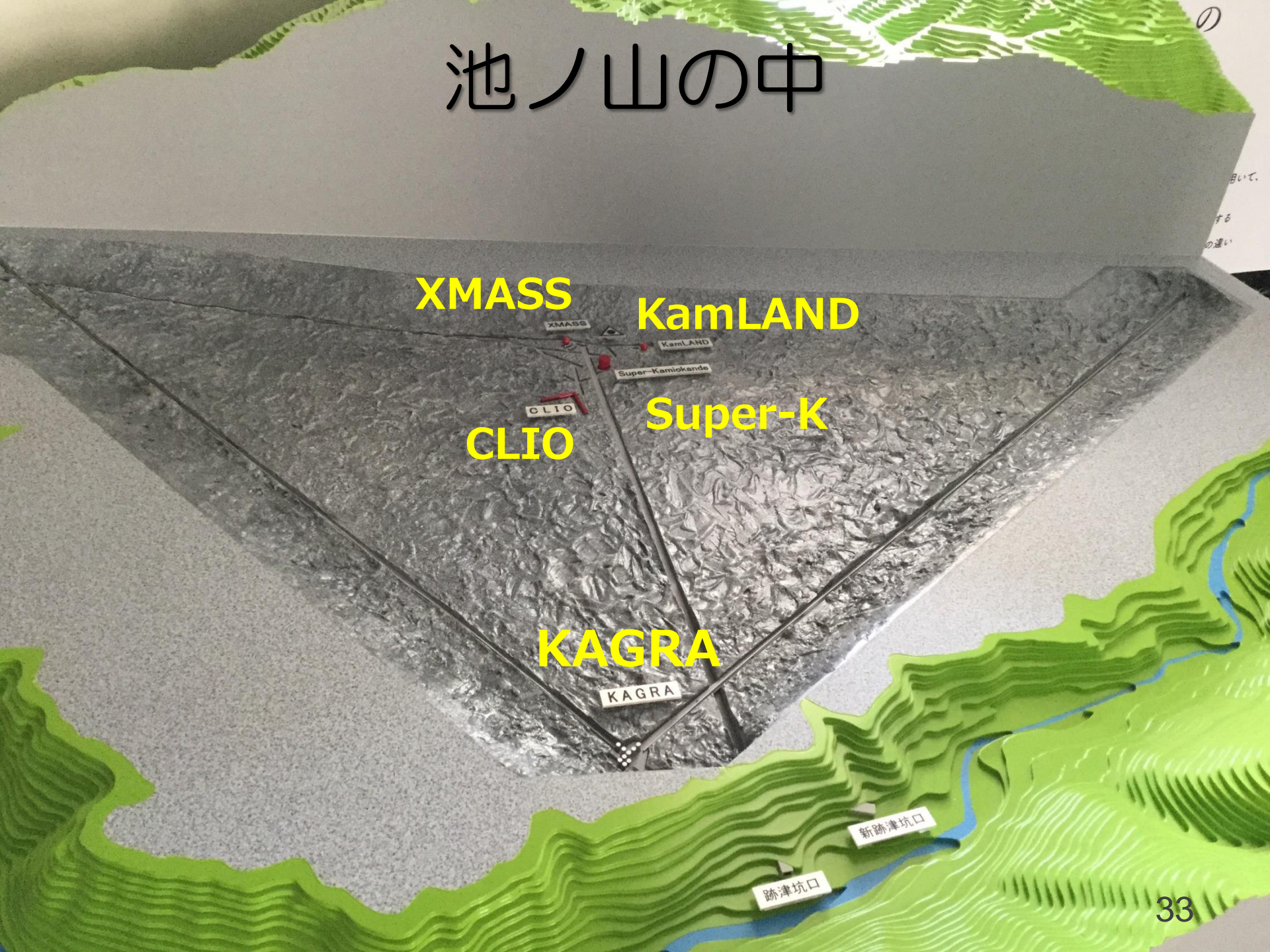


東北大学
ニュートリノ科学センター

神岡宇宙素粒子研究施設

Google

池ノ山の中



XMASS

KamLAND

CLIO

Super-K

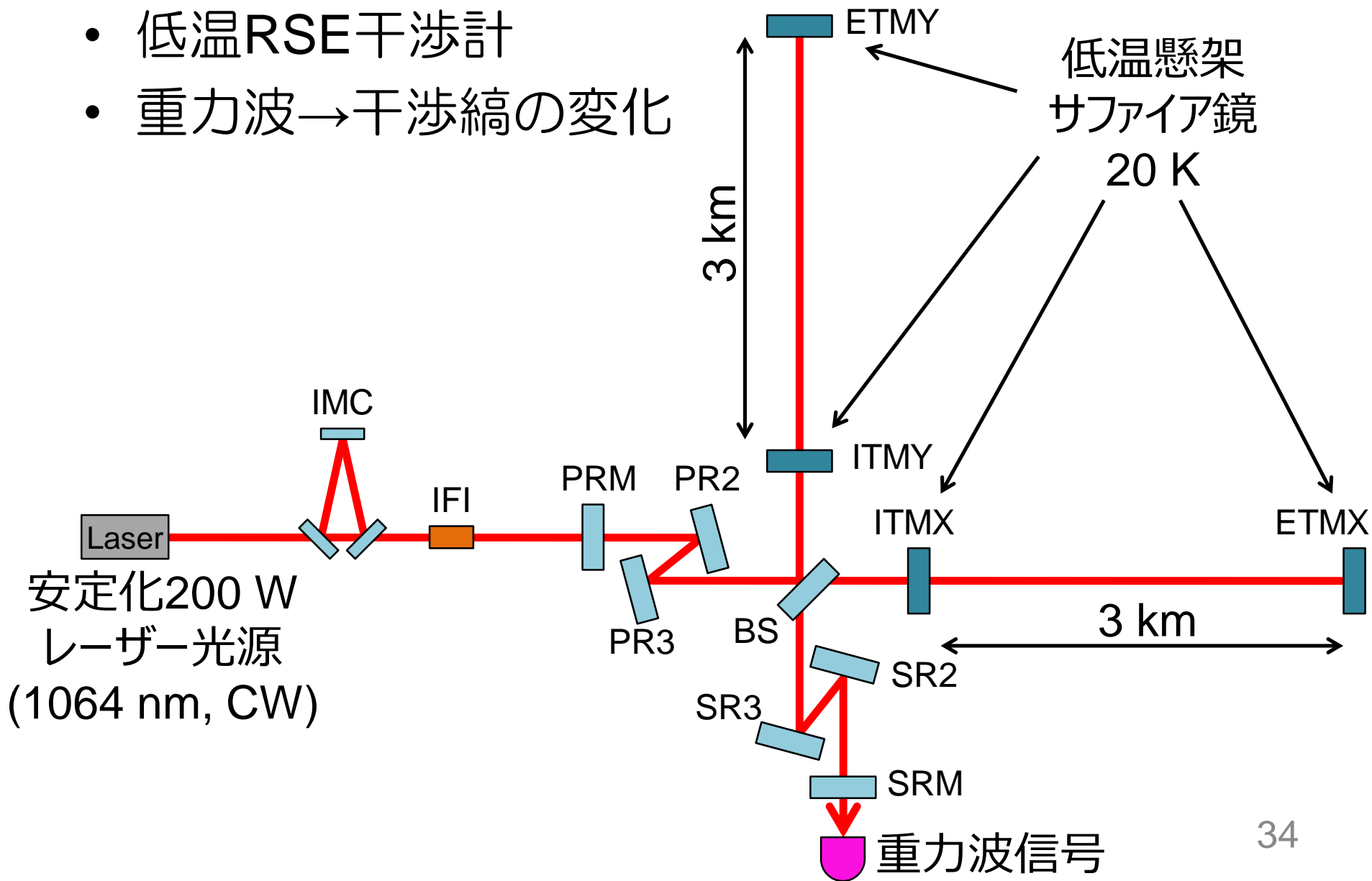
KAGRA

跡津坑口

新跡津坑口

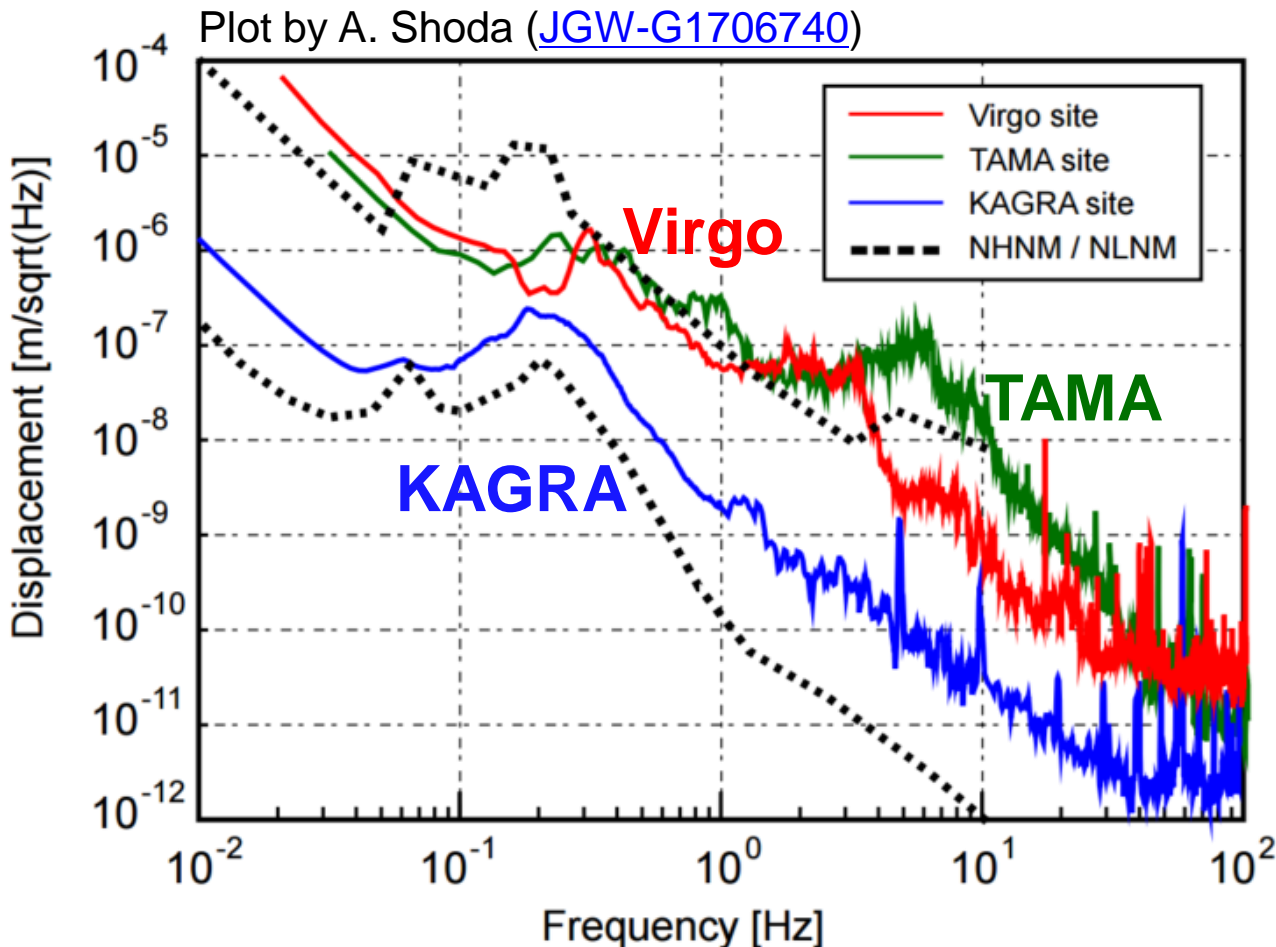
KAGRAの干渉計構成

- 低温RSE干渉計
- 重力波→干渉縞の変化



KAGRAの特徴

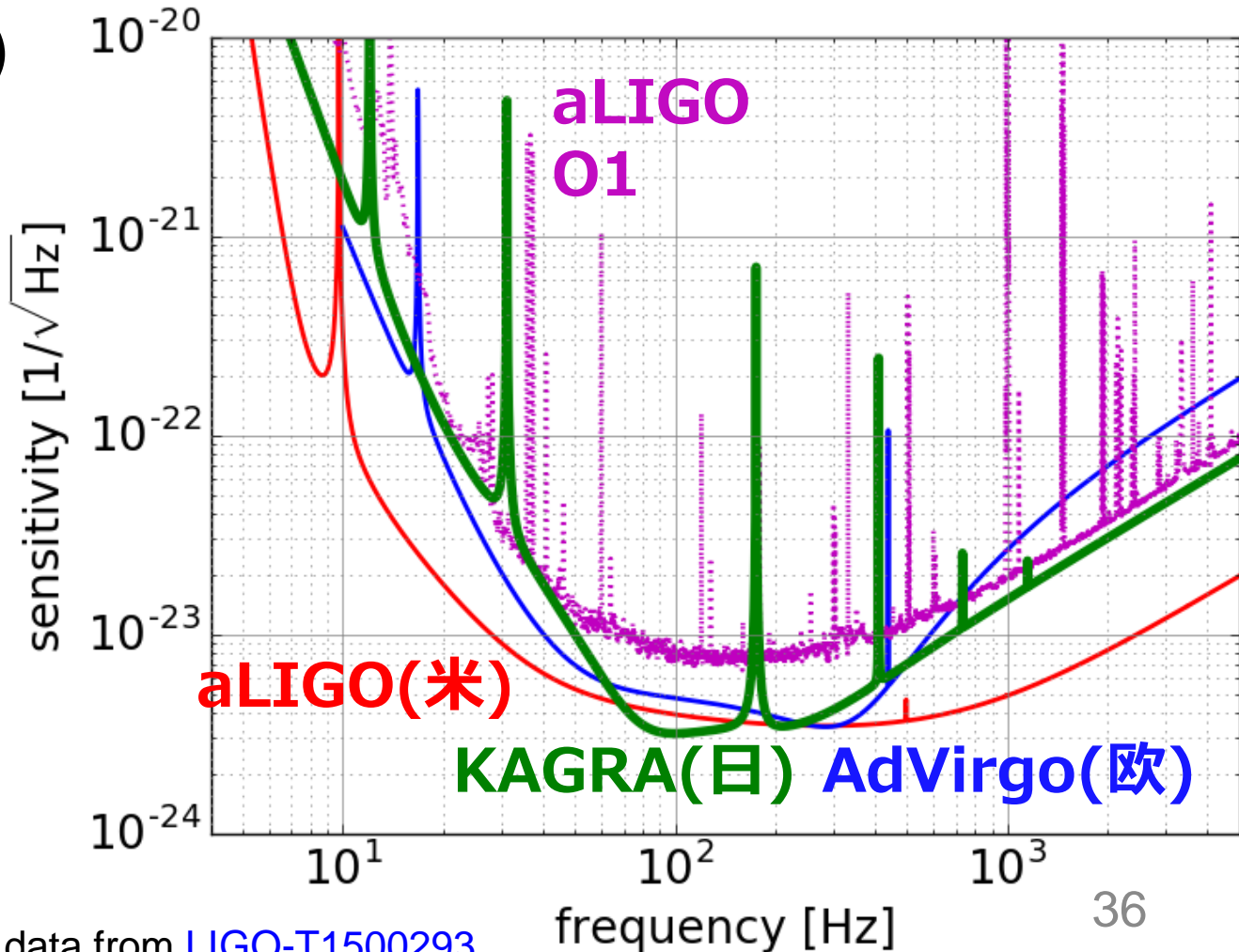
- 低温サファイア鏡で熱雑音を低減
- 地下建設で地面振動を低減



KAGRAの設計感度

- Advanced LIGOやAdvanced Virgoと同等

- NS-NS連星
(1.4-1.4 M_{\odot})
158 Mpc
BH-BH連星
(30-30 M_{\odot})
1 Gpc



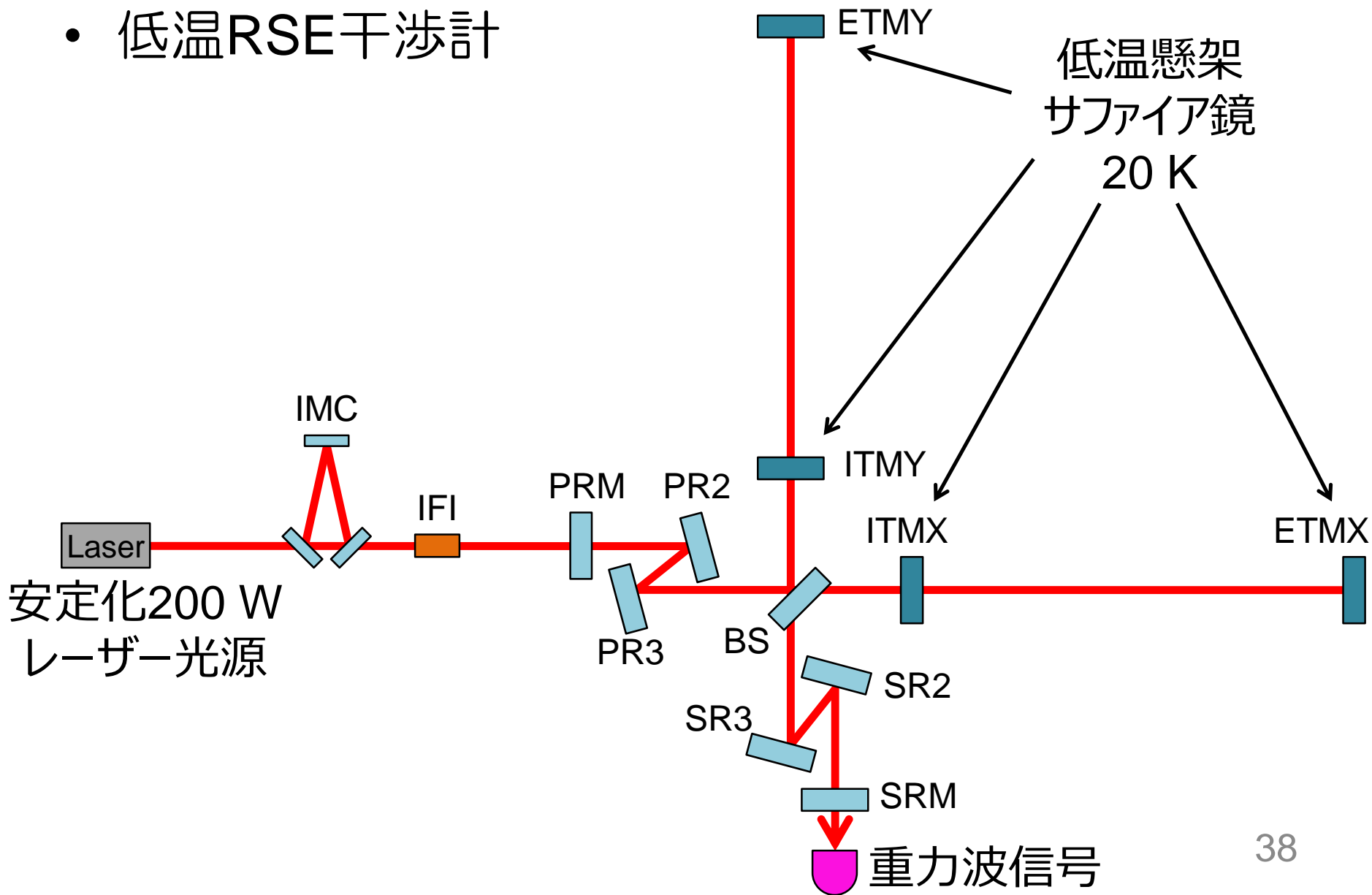
KAGRAの現状



- 2010年10月 プロジェクト**開始**
- 2014年3月 トンネル掘削工事完了
- 2015年11月 **第一期実験施設完成**記念式典
- 2016年3-4月 初の**試験運転**
3 kmの常温Michelson干渉計 (iKAGRA)
- 2018年3月 **低温**試験運転予定
3 kmの低温Michelson干渉計 (bKAGRA Phase 1)
- 2019年頃 **フル構成**での低温運転開始予定
3 kmの低温RSE干渉計 (bKAGRA Phase 2)
- 2020年頃 **観測**運転開始予定
3 kmの低温RSE干渉計 (bKAGRA Phase 3)

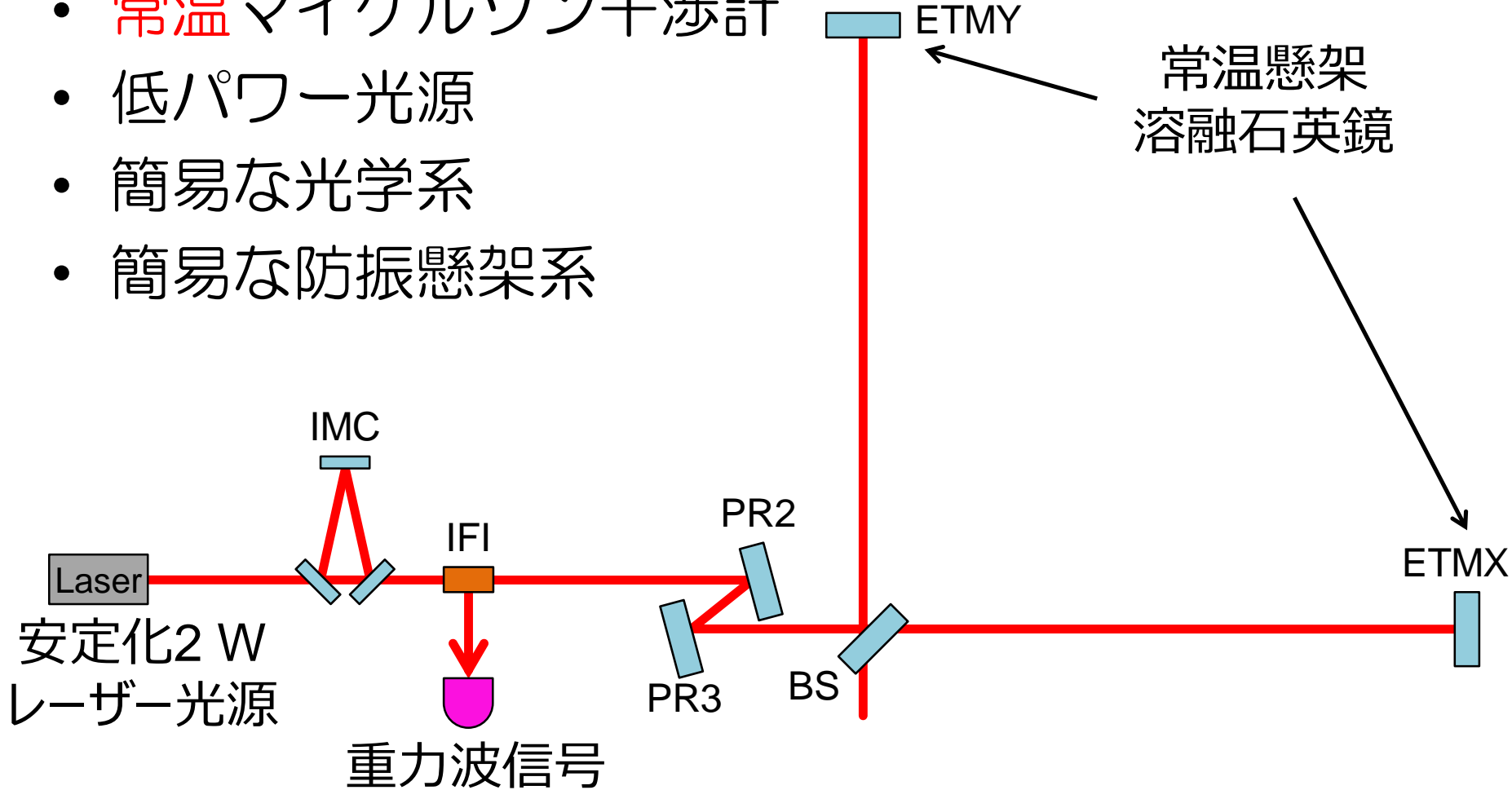
KAGRAのフル構成

- 低温RSE干渉計



iKAGRAの構成

- 常温マイケルソン干渉計
- 低パワー光源
- 簡易な光学系
- 簡易な防振懸架系



iKAGRA試験運転

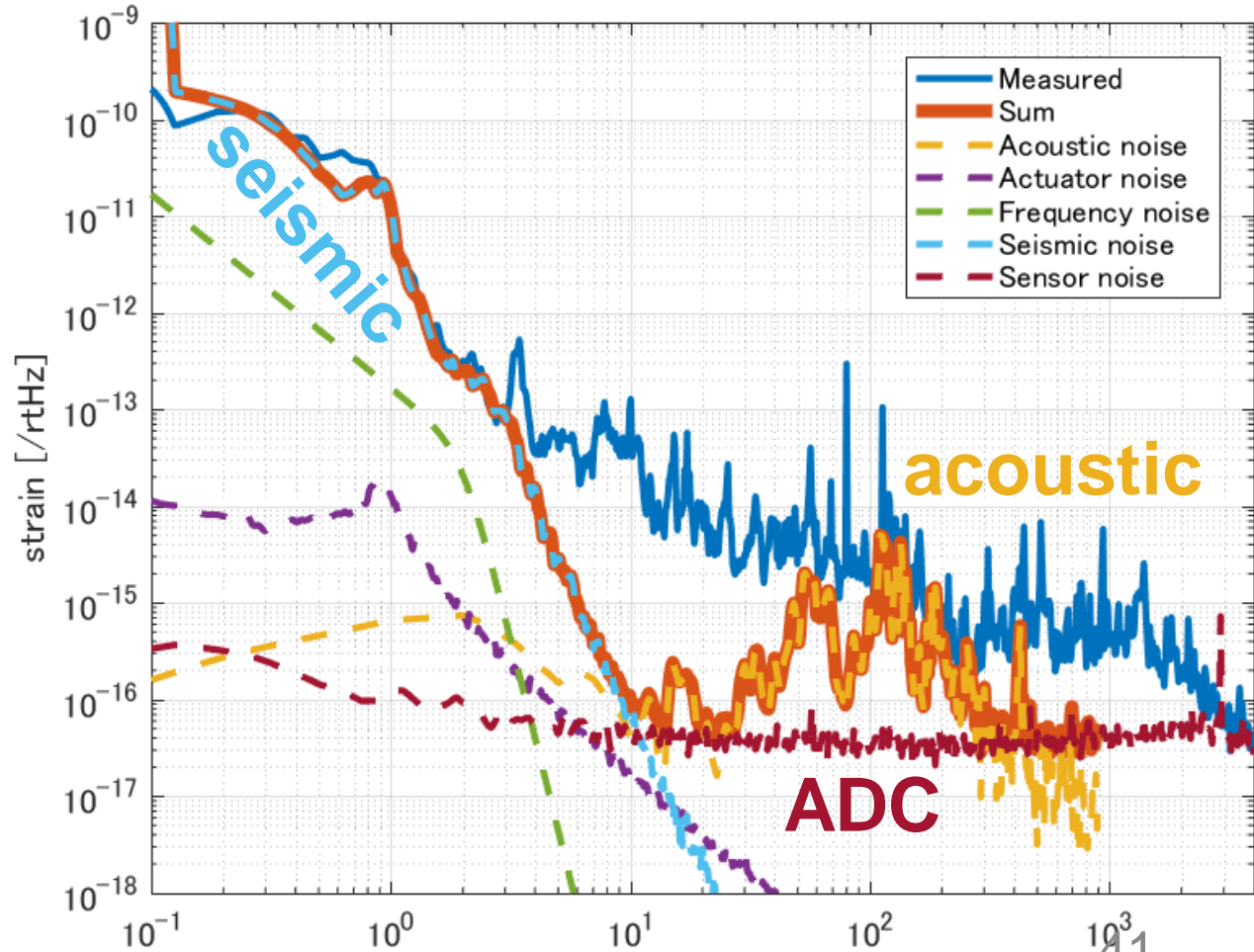
- 2016年3月25日9:00 から 3月31日17:00
2016年4月11日9:00 から 4月25日17:00 の2期間
- 目的:
 - 片腕3kmに及ぶ真空槽・ダクトのレイアウト確認
 - 制御系、データ取得・転送・解析系の試験
 - 観測体制の確立
 - 地下の環境
データの取得
 - km級干渉計運転
の感覚をつかむ



iKAGRAの感度

- $\sim 3e-15$ /rtHz @ 100 Hz、 NS-NS連星 ~ 4 pc
- 地面振動、音響雑音、ADC雑音で制限

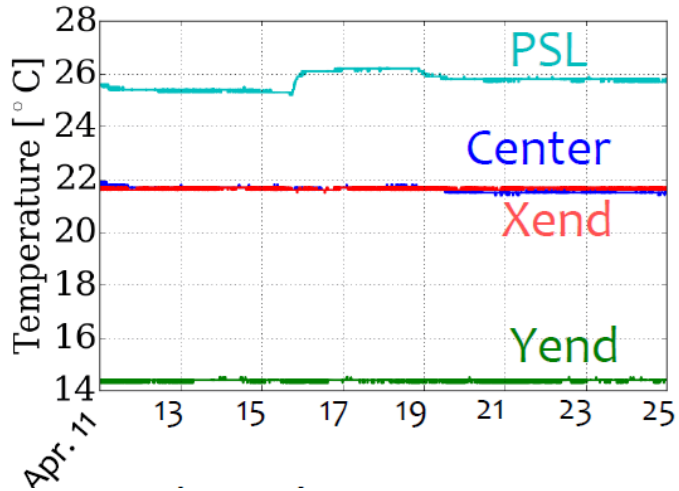
- 雑音源の特定に成功
- 極めて悪いが bKAGRA では全て低減可能



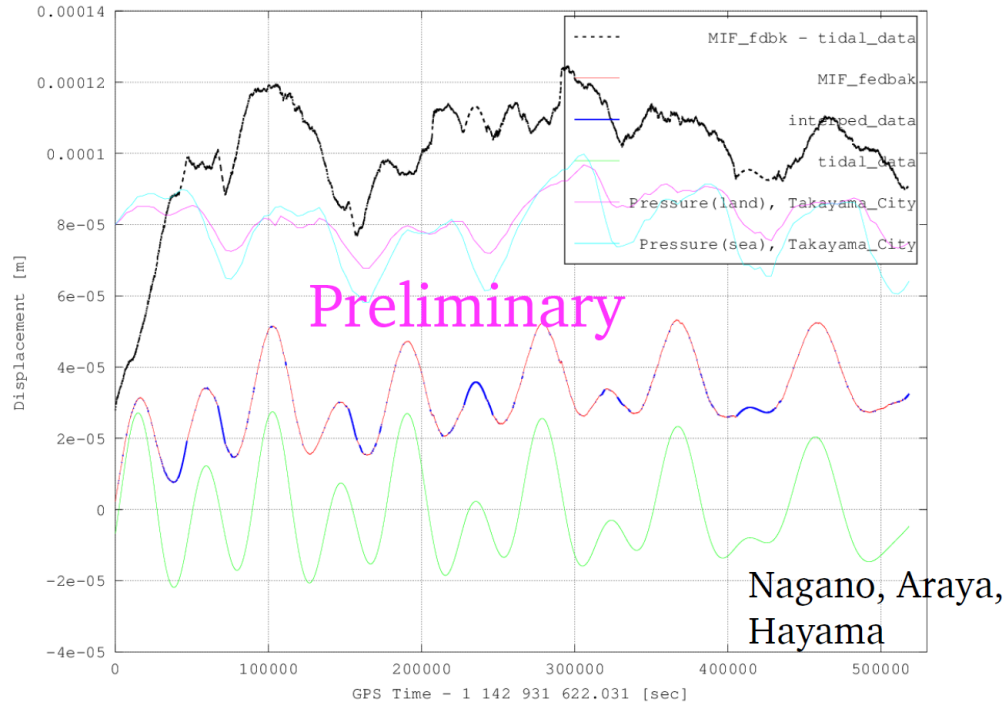
環境データ

- KAGRAの特殊な地下環境の評価

Temperature



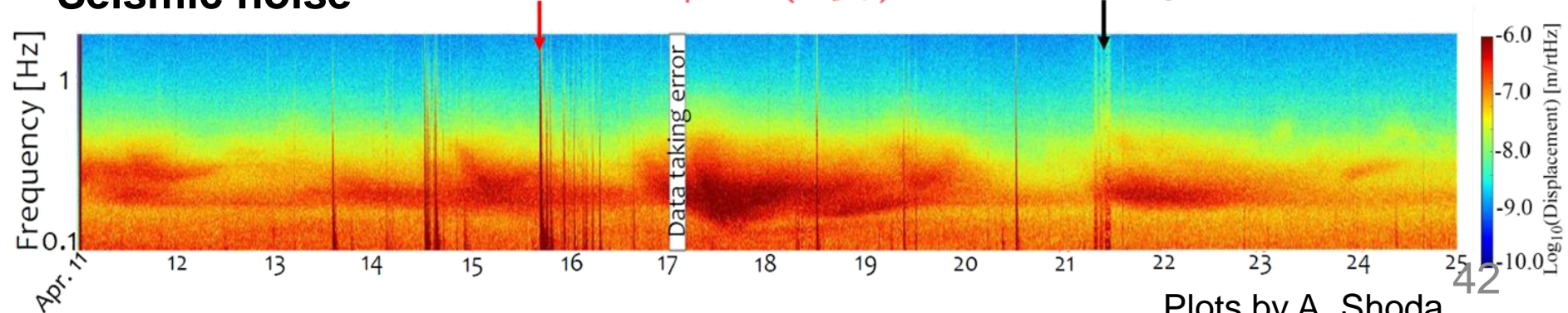
Tidal distortion



Seismic noise

Kumamoto earthquake (M5.7)

Data taking error



Plots by A. Shoda

データ転送・解析

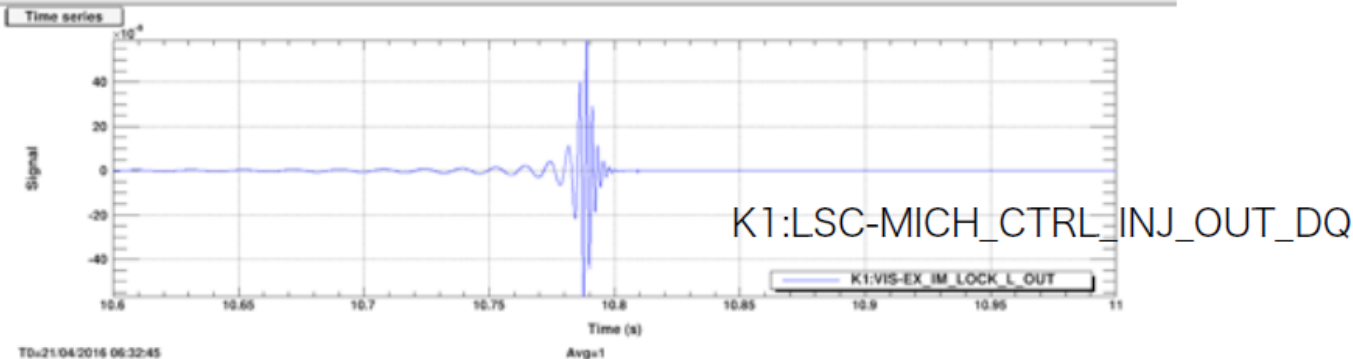
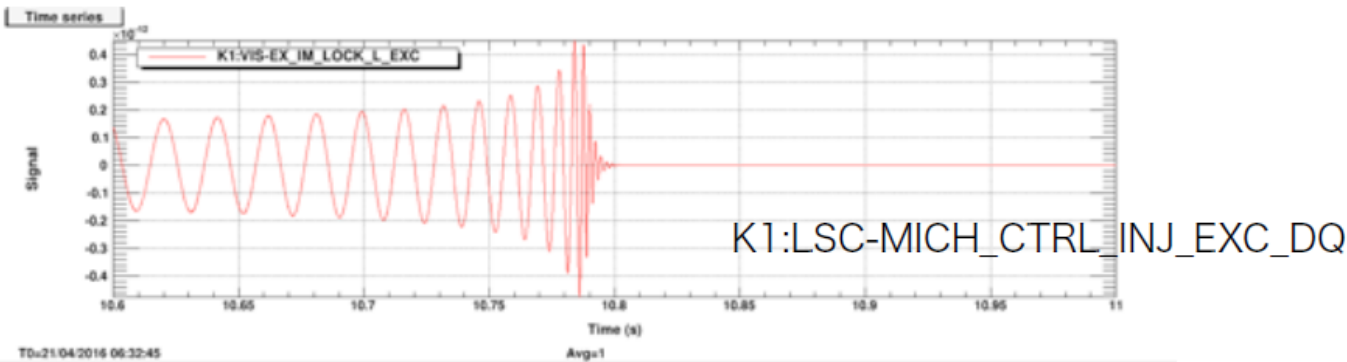
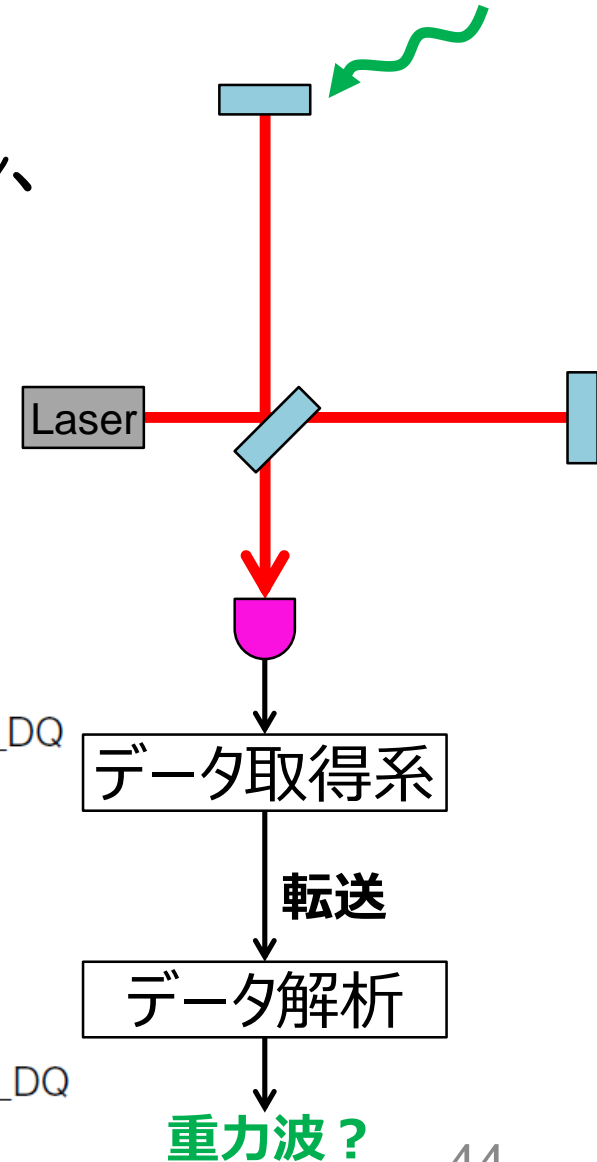
- リアルタイム転送 (遅延時間~3秒、~200 MB/sec)
宇宙線研究所(柏)
大阪市立大学
- オフライン転送
Academia Sinica(台湾)
KISTI(韓国)
- 合計7.5 TBのデータ
重力波信号
環境信号
各種モニタ信号



重力波信号の注入テスト

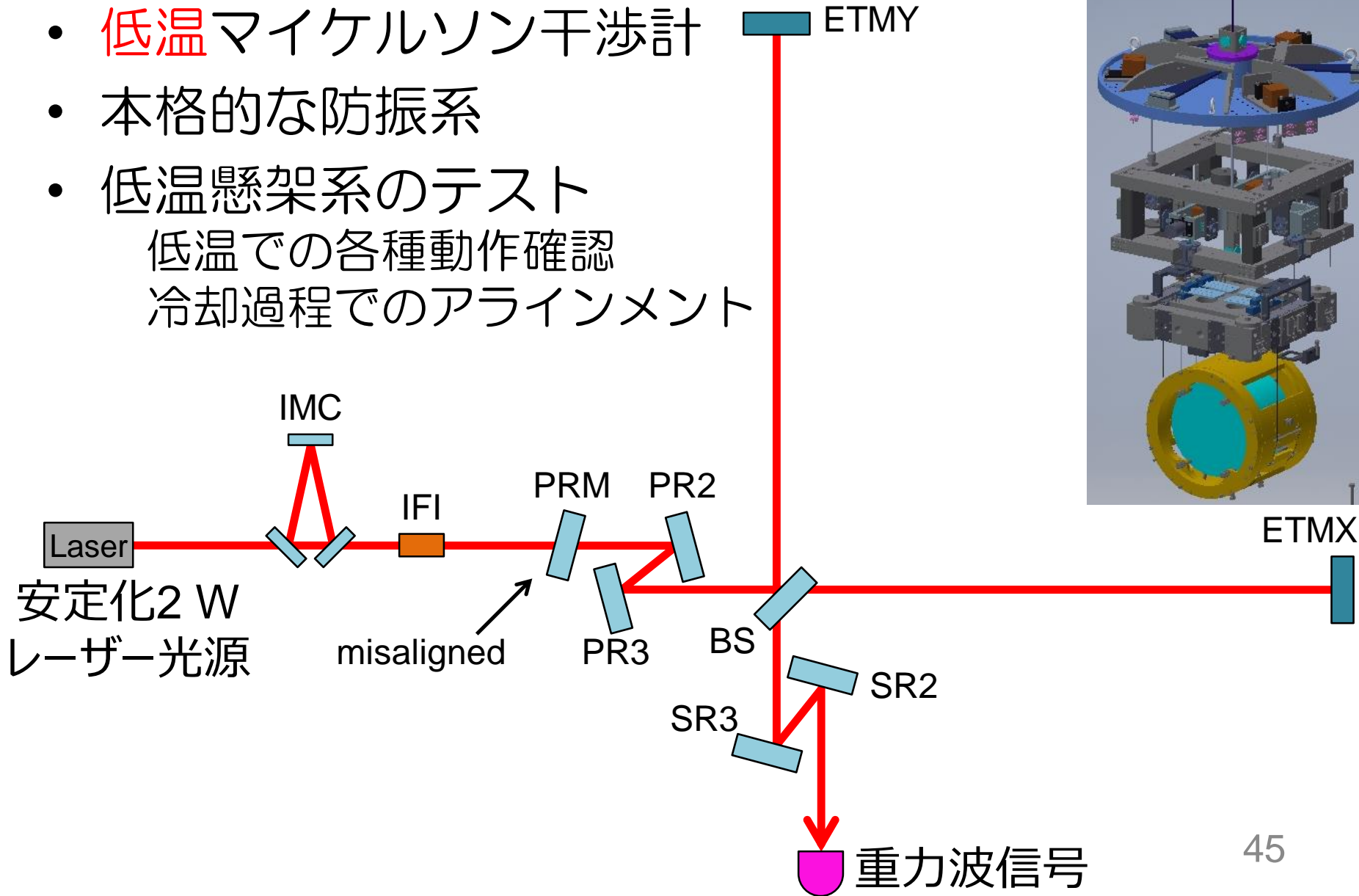
- 試験運転終了直後
- 生成した重力波波形で鏡を揺らし、信号を注入
- 干渉計から解析系までの重要な end-to-end test

波形注入



次のステップ: 低温試験運転

- **低温** マイケルソン干渉計
- 本格的な防振系
- 低温懸架系のテスト
低温での各種動作確認
冷却過程でのアライメント



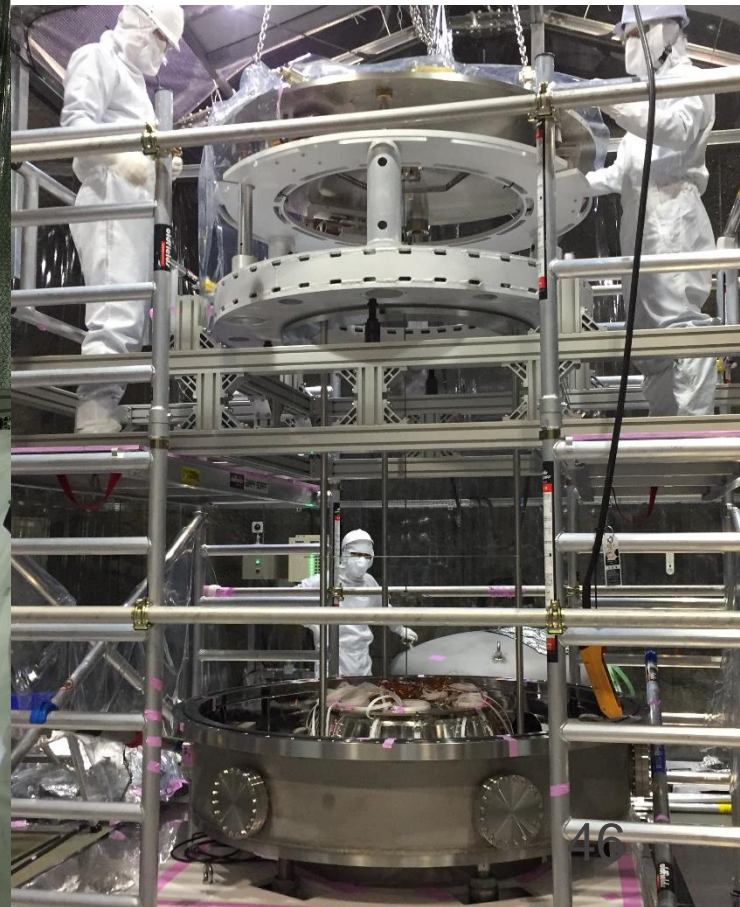
鏡の懸架系インストール

- PR系、BS、ETMY懸架系のインストール中

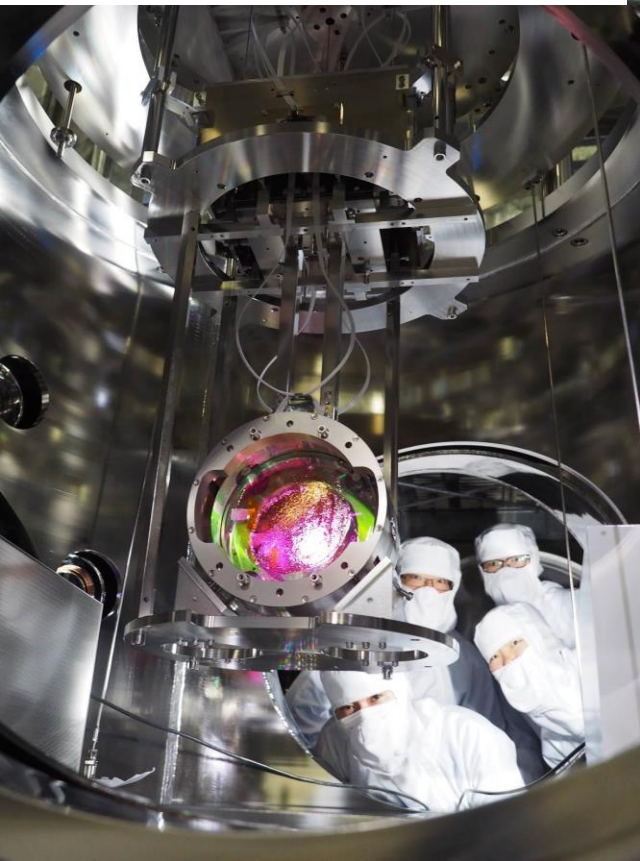
BS



ETMY



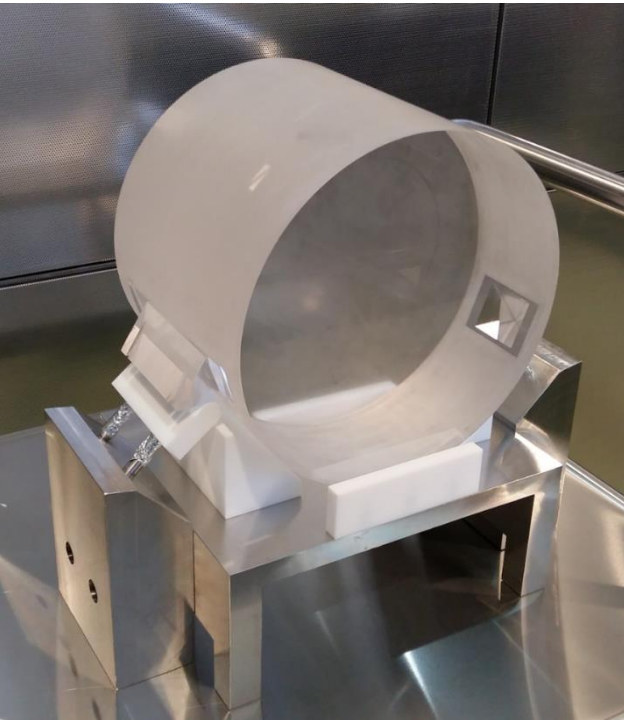
PR3



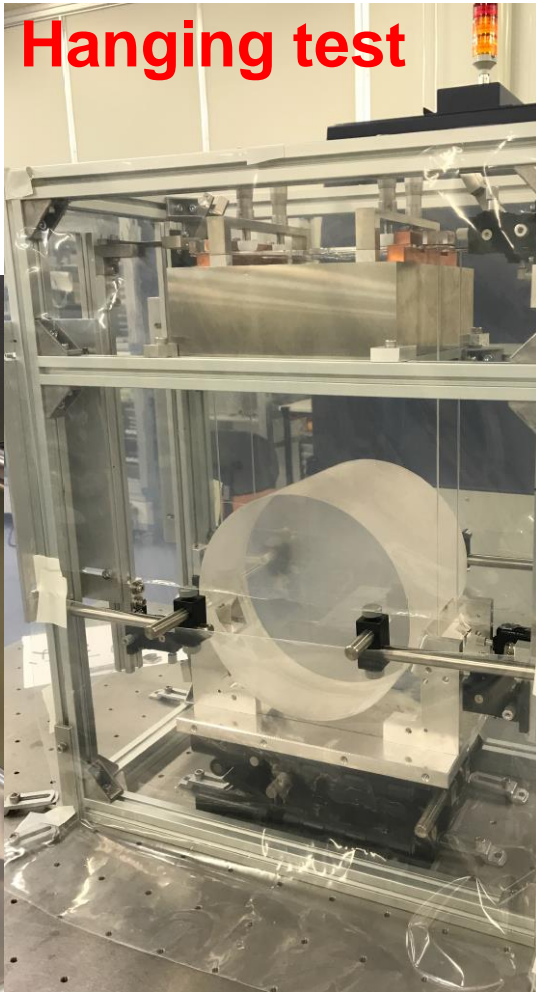
低温懸架系の開発

- KEK、国立天文台、富山大で各種試験中
- 9月に1台目を導入予定

HCB test

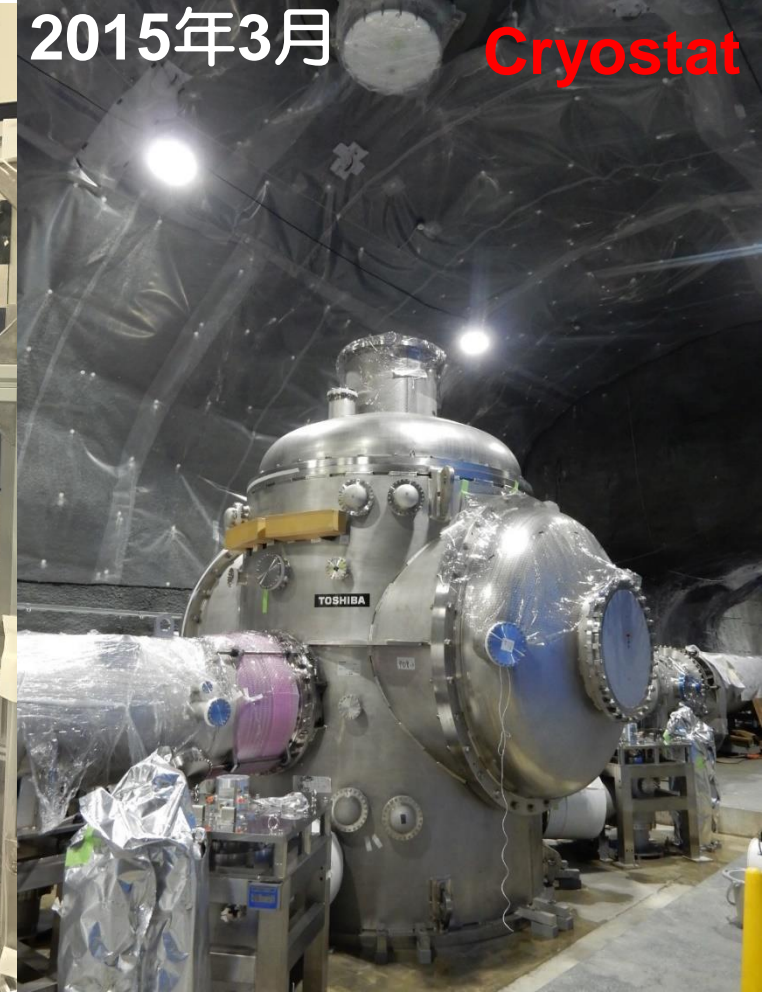


Hanging test



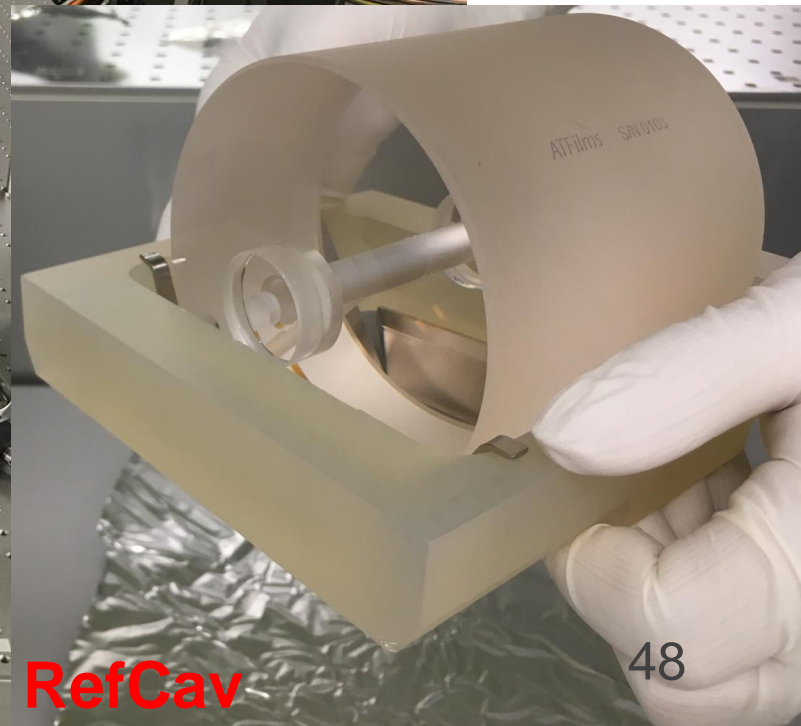
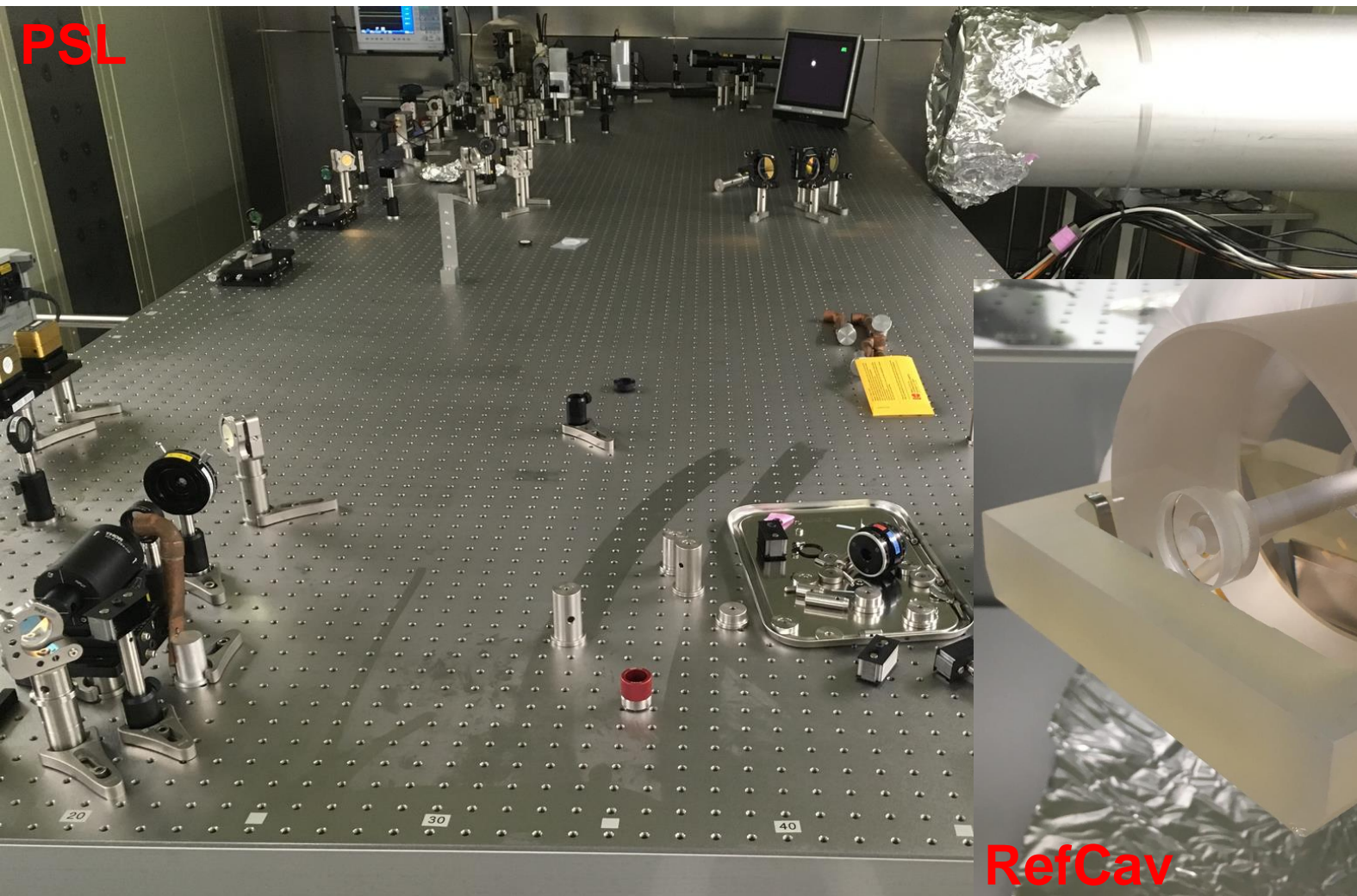
2015年3月

Cryostat



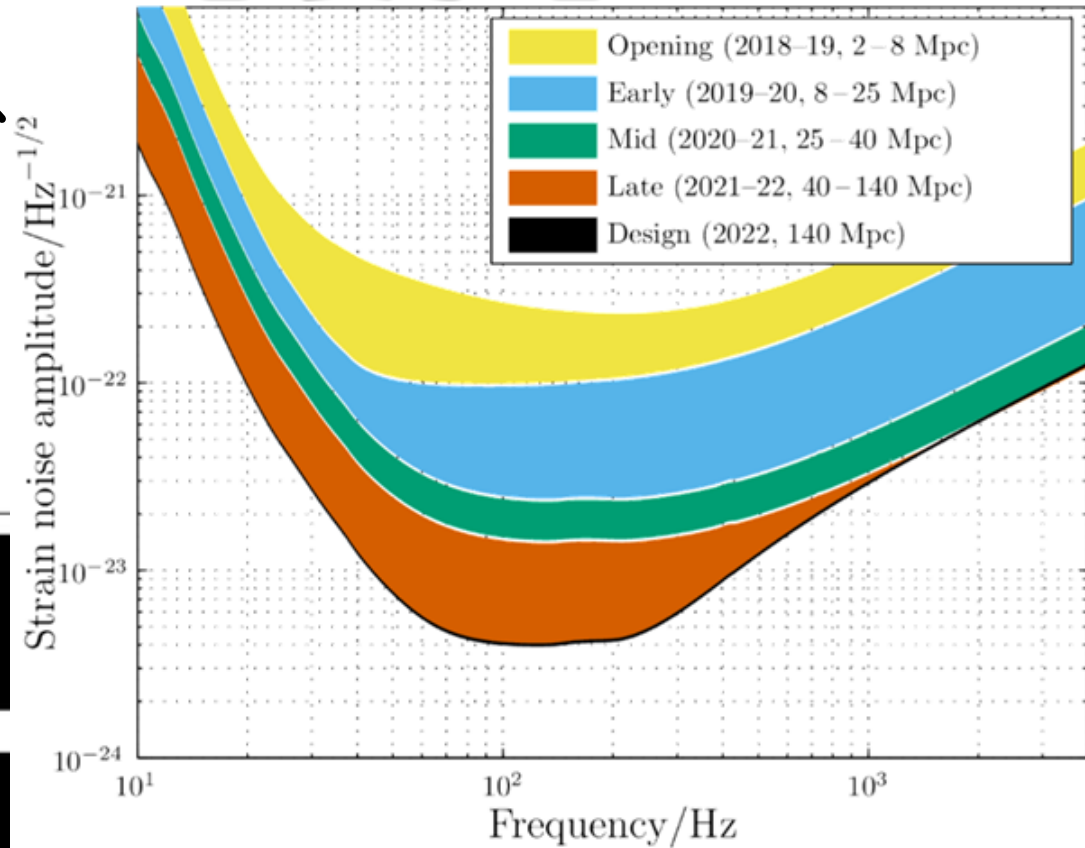
入射光学系のアップグレード

- 高パワー対応光学系へと交換中
(光源はしばらく2Wのまま)

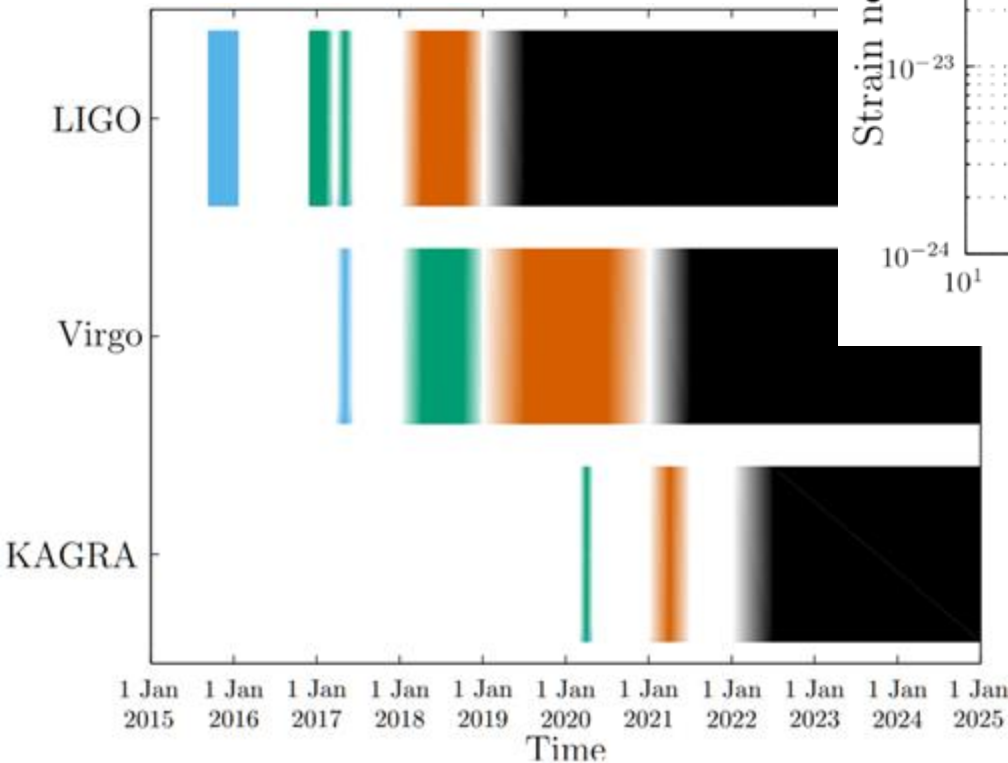


KAGRAの感度予想

- 観測参加はO3以降、2020年頃か？

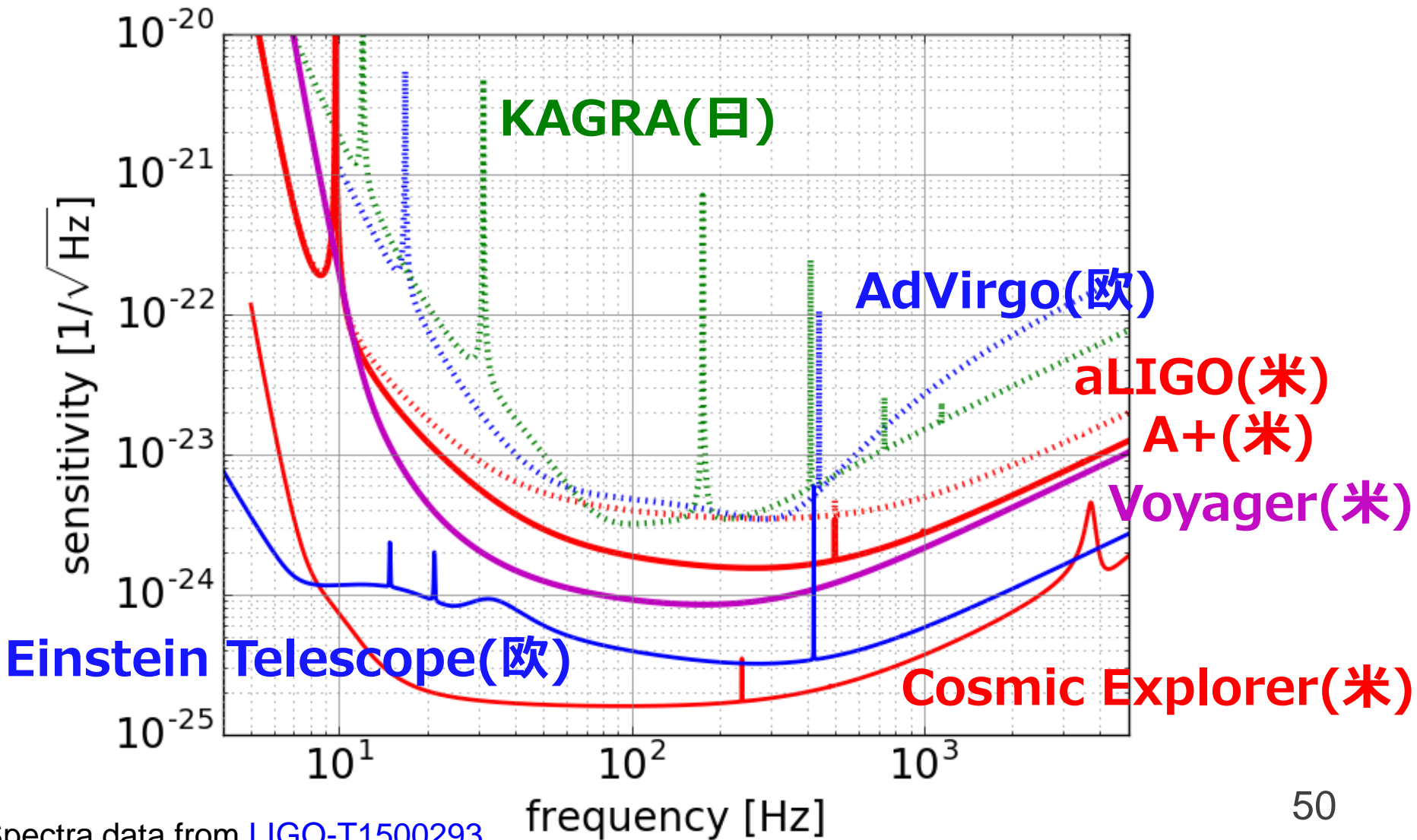


O1 O2 O3

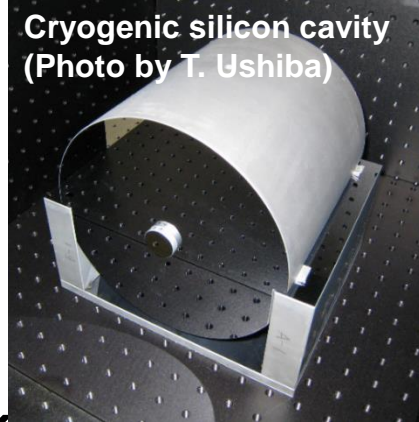


さらなる高感度化

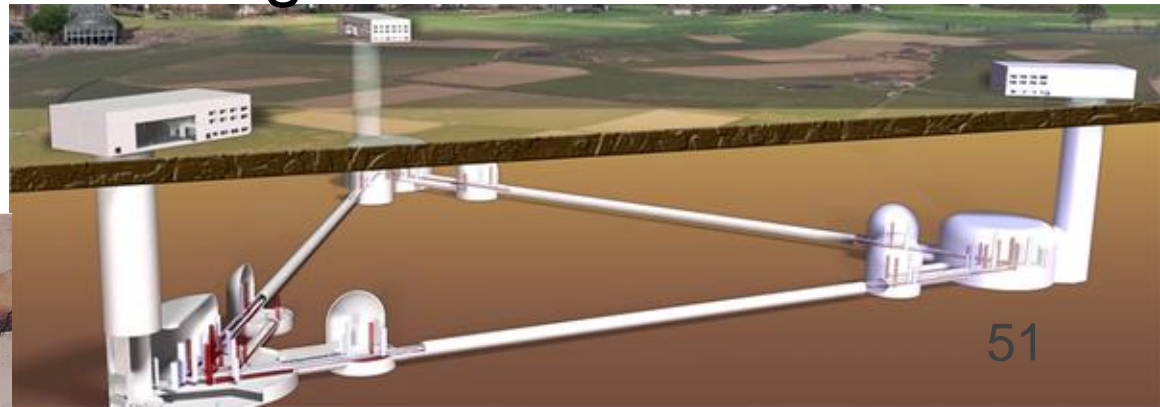
- 各国で次期計画を構想中



高感度化計画

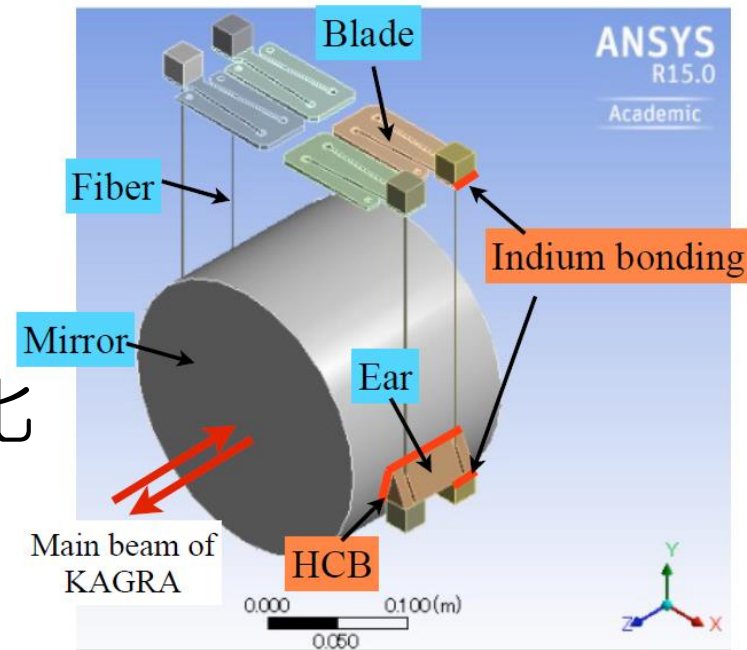


- LIGO (アメリカ)
 - A+: 量子光学的手法(スクイーミング)
 - Voyager: 200 kg シリコン鏡 @ 123 K
- 次世代計画
 - Einstein Telescope (ヨーロッパ)
 - 地下 10 km の低周波特化低温干渉計(10 K)と高周波特化常温干渉計の2種類
 - Cosmic Explorer (アメリカ)
 - 40 km 干渉計、320 kg シリコン鏡 @ 123 K



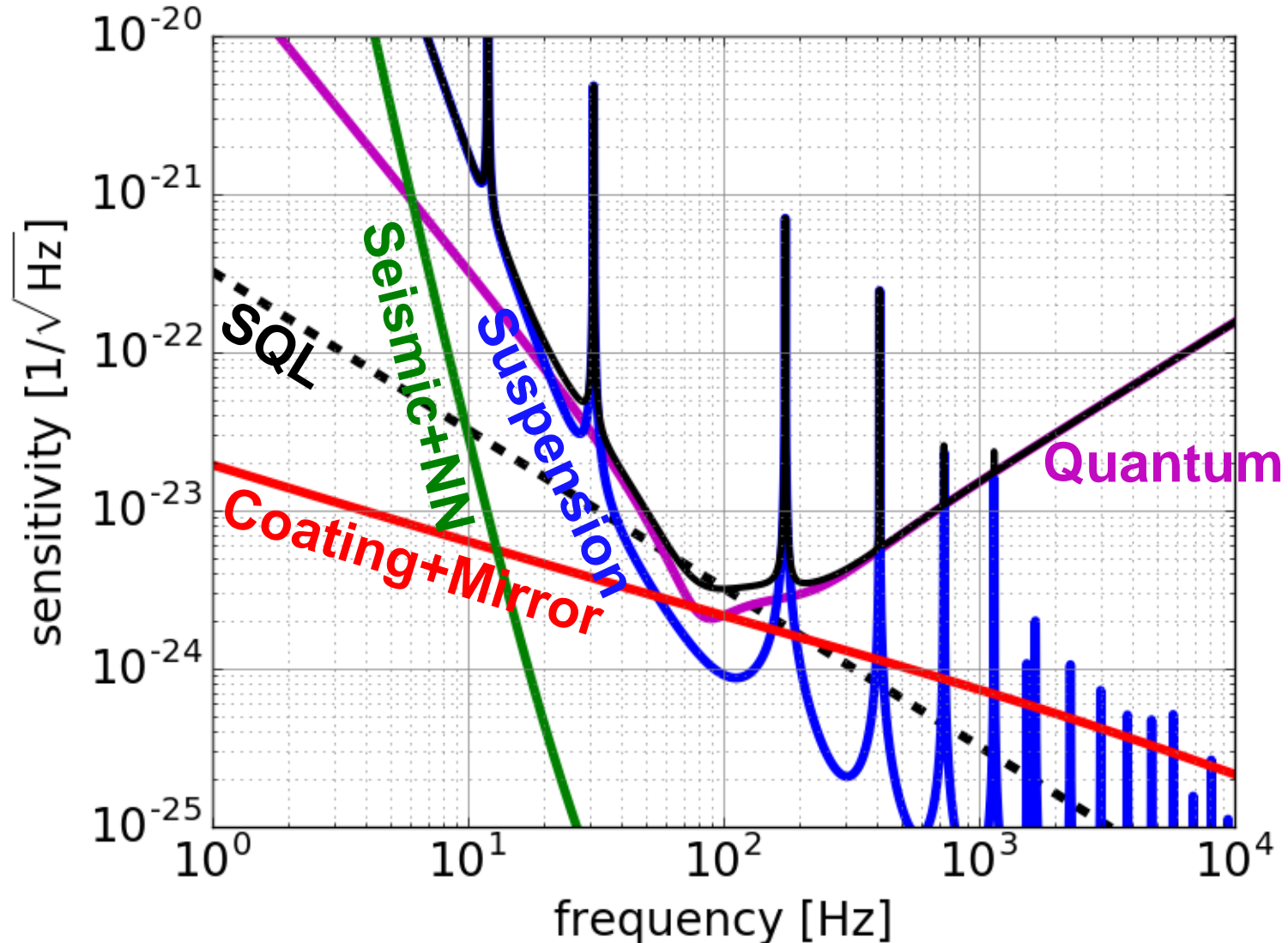
KAGRAのさらなる高感度化

- 低温と地下建設は次世代計画を先取りする特徴
- 一方で技術的に未成熟だった部分も
 - 大きなサファイア鏡を作れなかった
 - aLIGO/AdVirgoは40 kg
 - KAGRAは23 kg
 - 鏡の排熱のための太いサファイアファイバでサスペンション熱雑音悪化
 - 鏡の吸熱を抑えるために低レーザー強度
 - aLIGO/AdVirgoは700 kW
 - KAGRAは400 kW
- 少ない投資で高感度化の余地が十分ある



現在のKAGRA設計感度

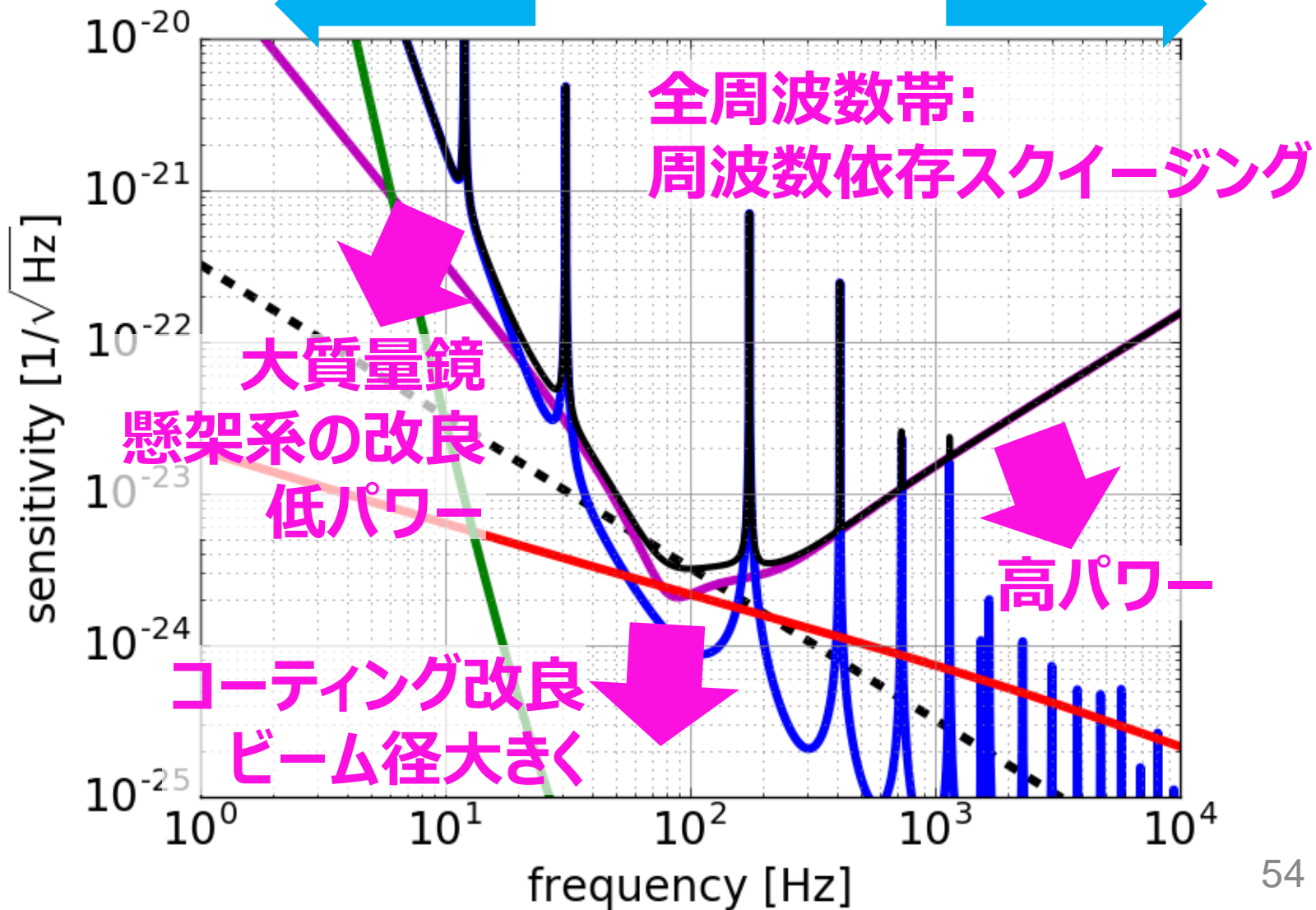
- サスペンション熱雑音と量子雑音で制限



高感度化の方向性

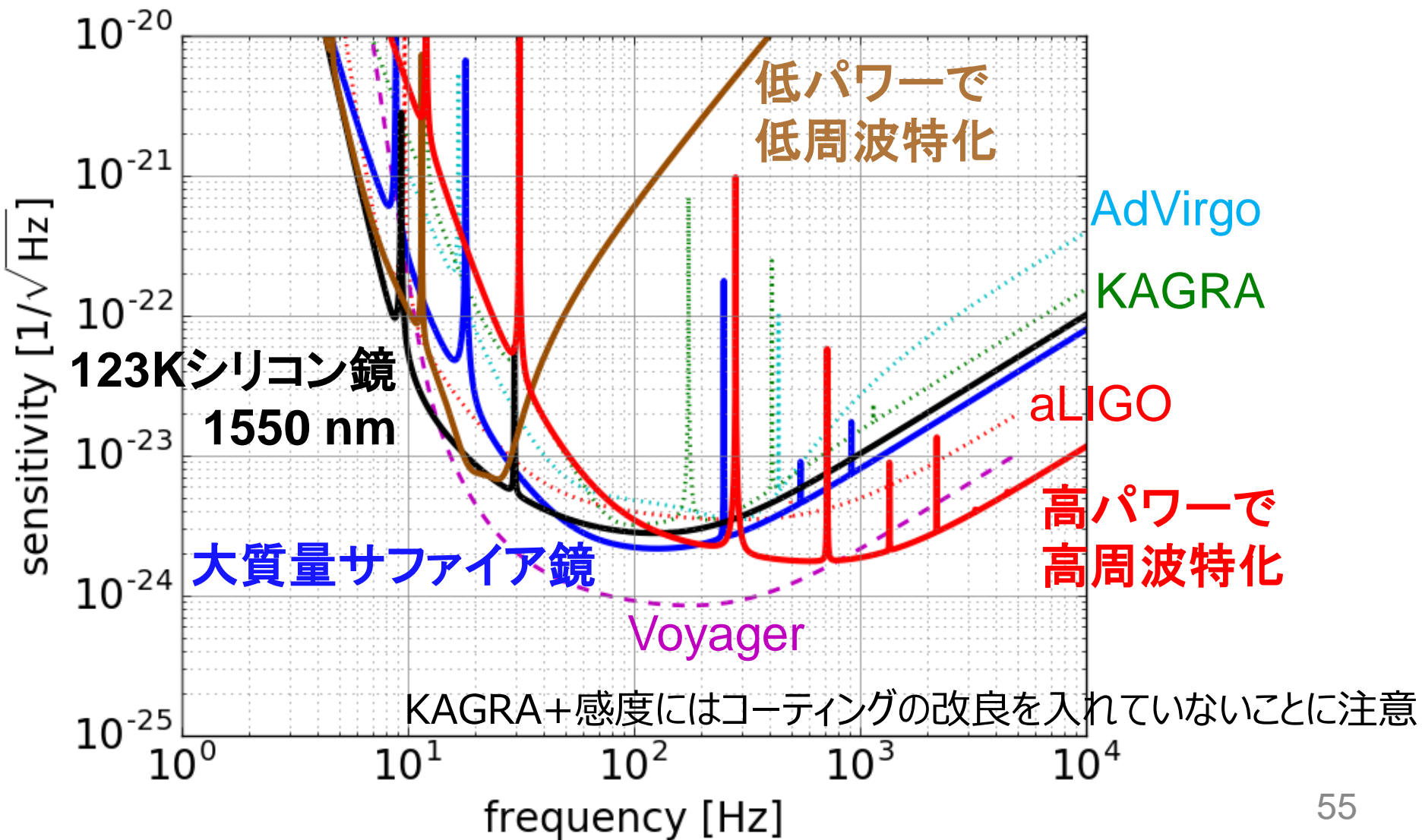
より重いBHなど

NSの状態方程式、超新星爆発など



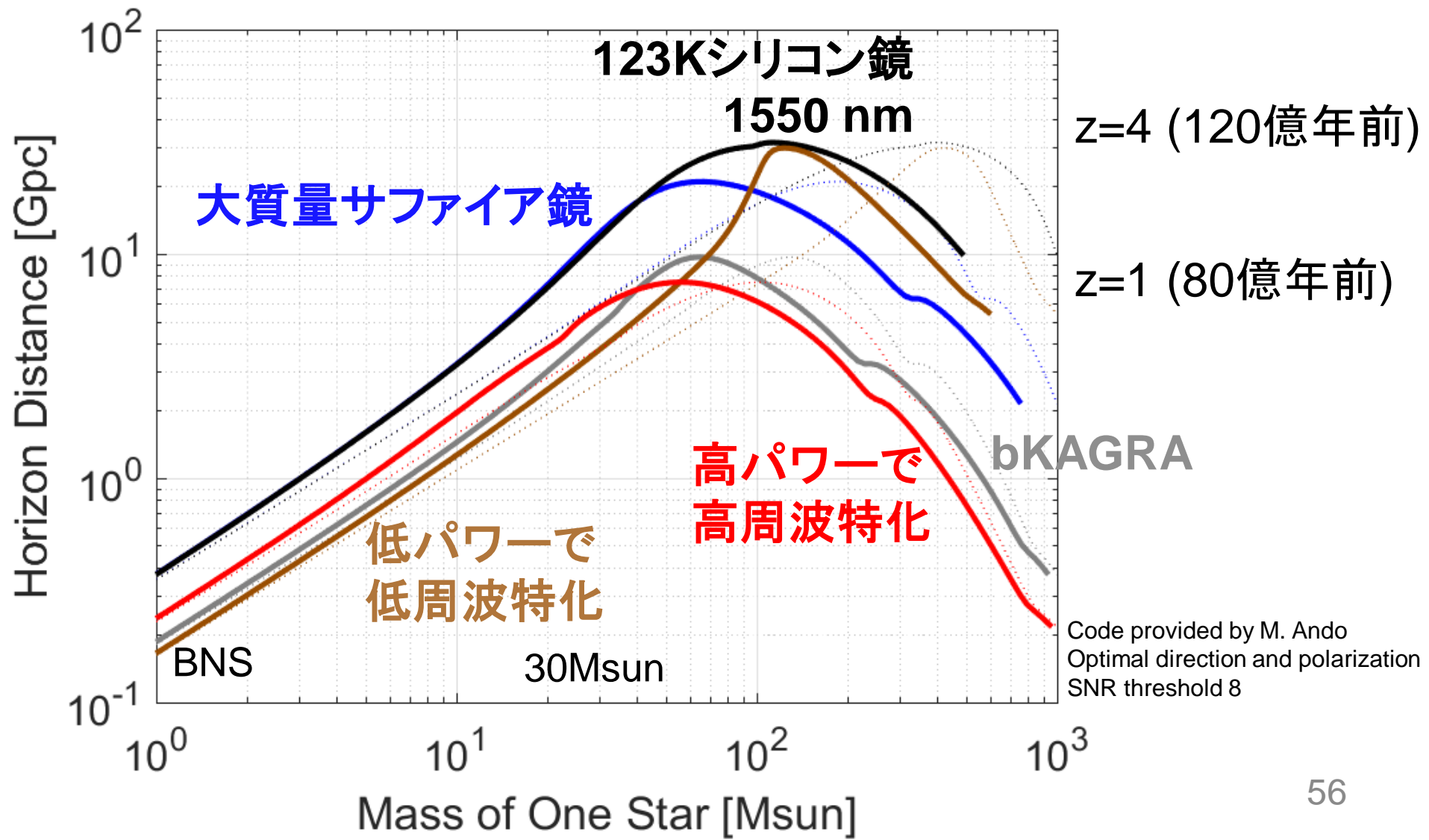
KAGRA+案の感度

- さまざまな高感度化案(KAGRA+)を思案中



KAGRA+案の観測可能距離

- さまざまな高感度化案(KAGRA+)を思案中

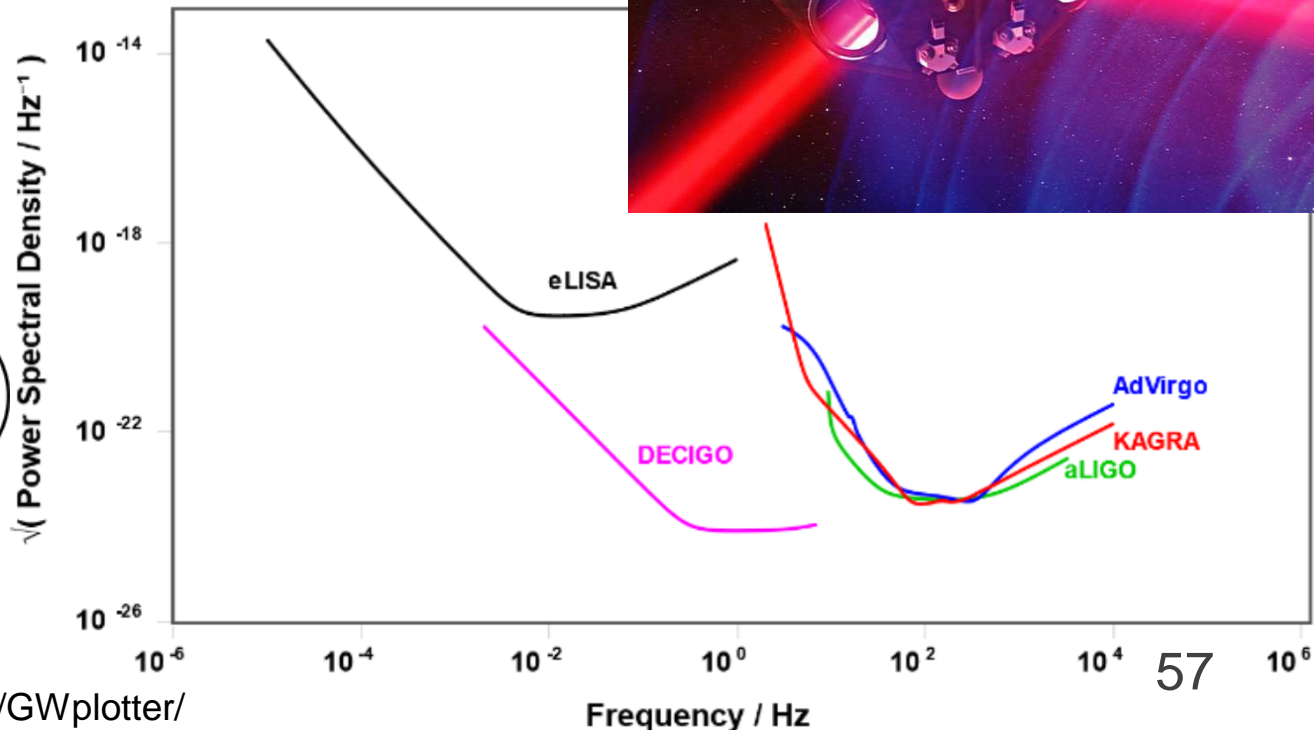
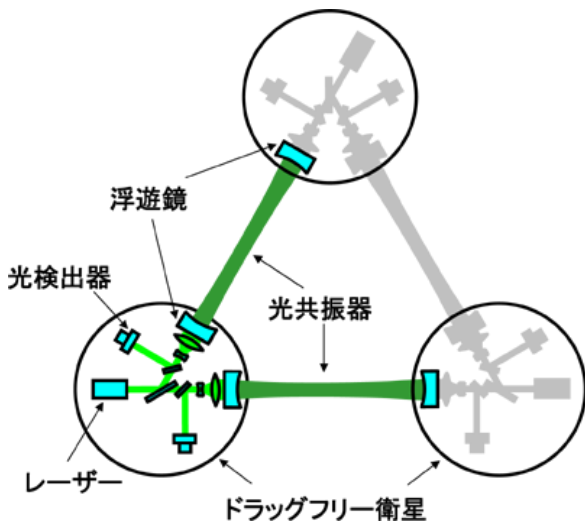
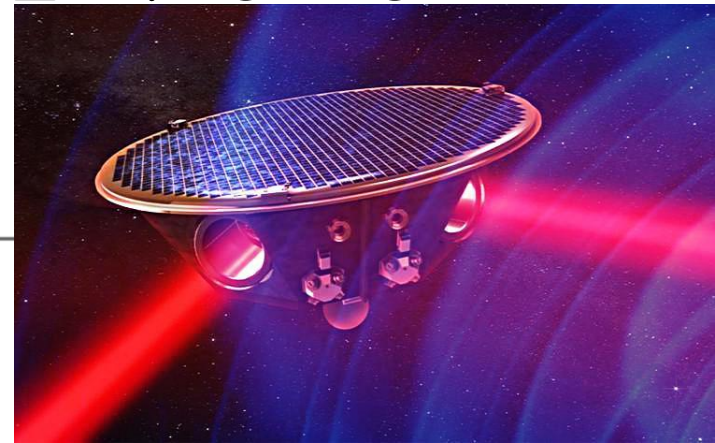


宇宙重力波望遠鏡

- 宇宙には地面振動がない、超長基線長が可能
→ 低周波重力波の探査

原始重力波、大質量BH連星、などなど

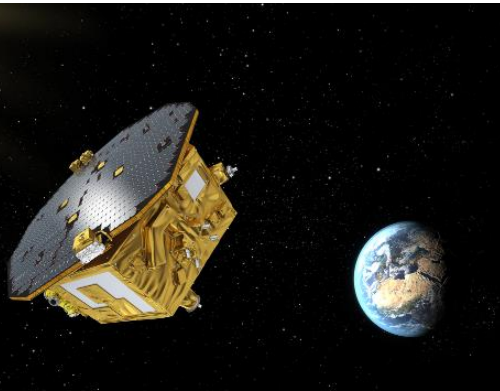
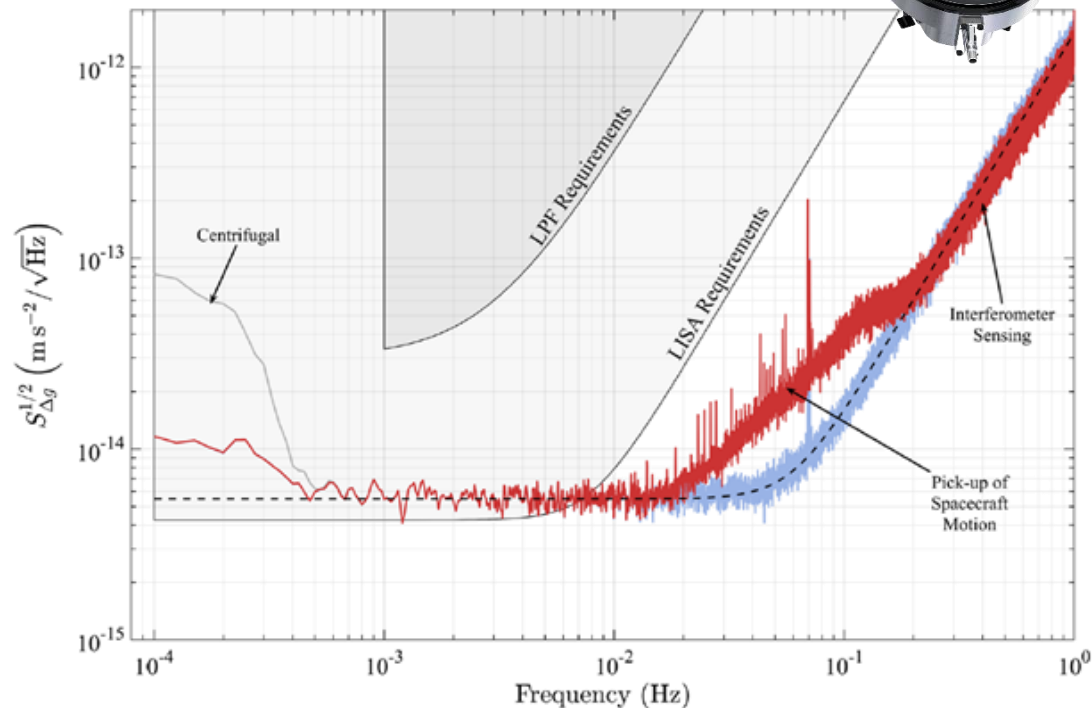
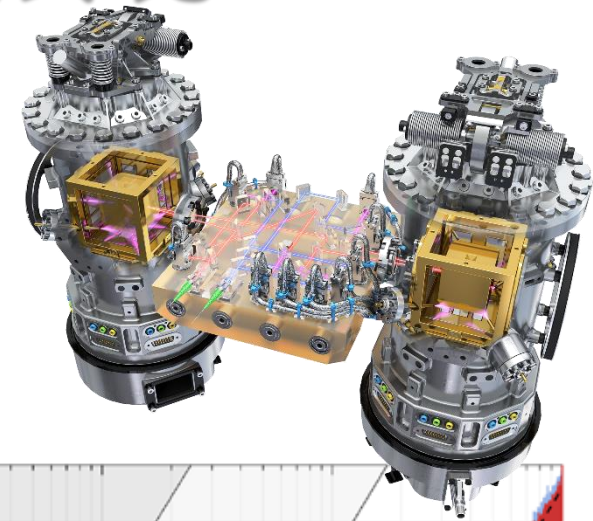
- LISA計画(欧州)
- DECIGO計画(日本)



LISA Pathfinderの成功

- LISAの技術実証機
- 2015年12月 打ち上げ
- 2016年6月 最初の結果公開
- 2017年7月 ミッション終了予定

- 2017年1月 ESAに
L3 ミッション提案
(採択されれば
2030年頃打ち上げ?)



まとめ

- 重力波天文学の幕が開けた
- まだまだやることはたくさん
 - 大きな恒星質量ブラックホールの起源
 - ブラックホールの準固有振動
 - 重力波国際観測ネットワーク
 - 到来方向の決定、重力理論の検証
 - 中性子星連星、ブラックホール中性子星連星
 - マルチメッセンジャー観測 などなどなど
- 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
 - 地下建設と低温で雑音を下げる独自の工夫
 - 2020年頃に観測開始？
- 将来計画も着実に進行中
 - 大型化、低温化、地下建設、宇宙計画

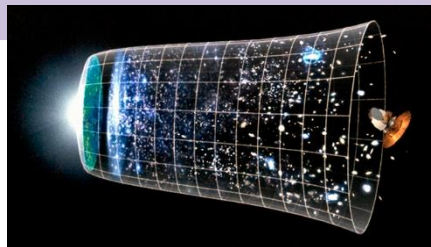
Additional Slides

地上重力波望遠鏡の比較

	KAGRA	AdVirgo	aLIGO	A+	Voyager
Arm length [km]	3	3	4	4	4
Mirror mass [kg]	23	42	40	80	200
Mirror material	Sapphire	Silica	Silica	Silica	Silicon
Mirror temp [K]	21	295	295	295	123
Sus fiber	35cm Sap.	70cm SiO ₂	60cm SiO ₂	60cm SiO ₂	60cm Si
Fiber type	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber	Ribbon
Input power [W]	78	125	125	125	140
Arm power [kW]	400	700	710	1150	3000
Wavelength [nm]	1064	1064	1064	1064	2000
Beam size [cm]	3.5 / 3.5	4.9 / 5.8	5.5 / 6.2	5.5 / 6.2	5.8 / 6.2
SQZ factor	0	0	0	6	8
F. C. length [m]	none	none	none	16	300

様々な周波数による重力波観測

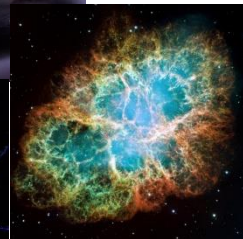
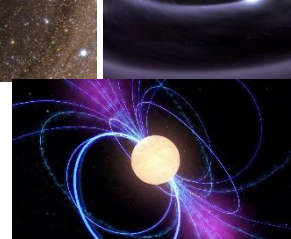
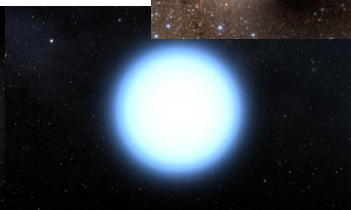
原始重力波



質量大



質量小



周期 宇宙年齢

年

時間

秒

ミリ秒

周波数

Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

地上干渉計

10^3

Pulsar timing



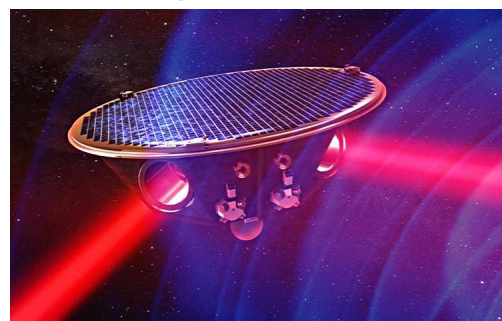
Doppler tracking

宇宙干渉計

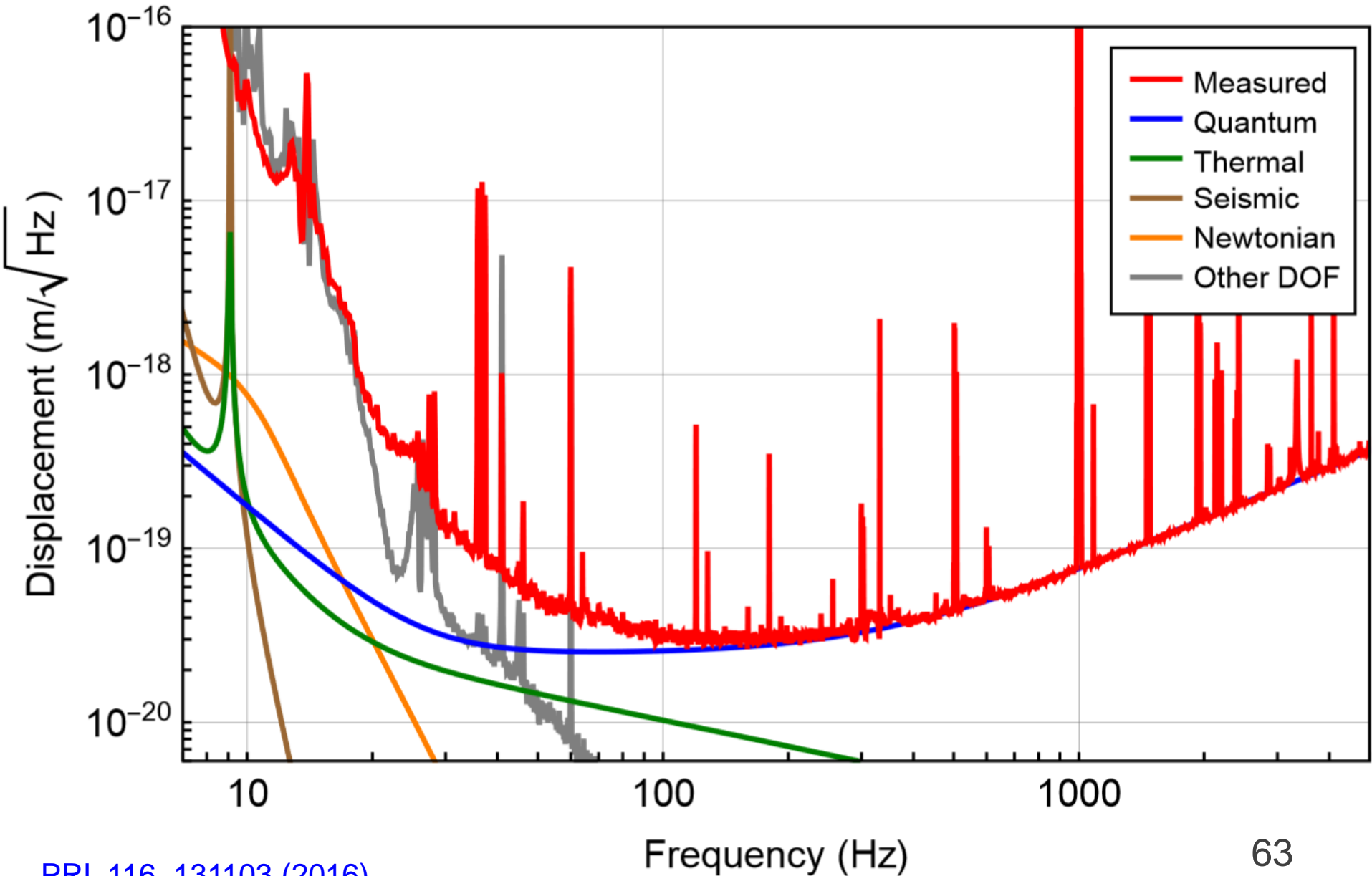


共振型

CMB B-mode

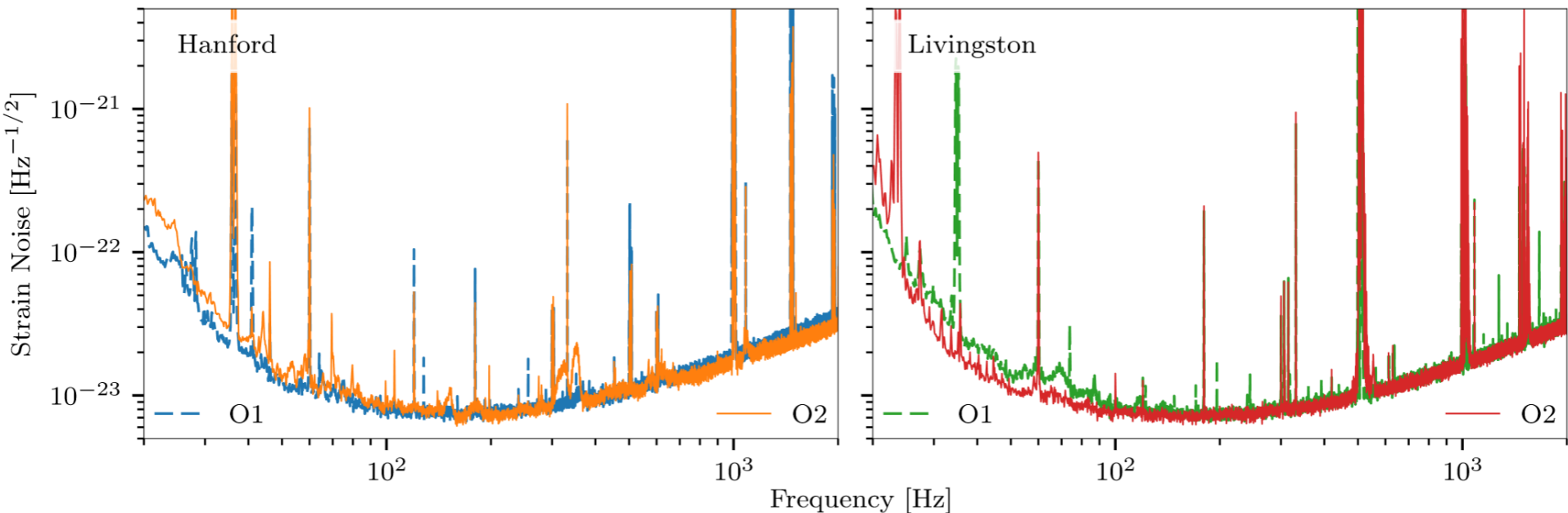


Advanced LIGO O1感度



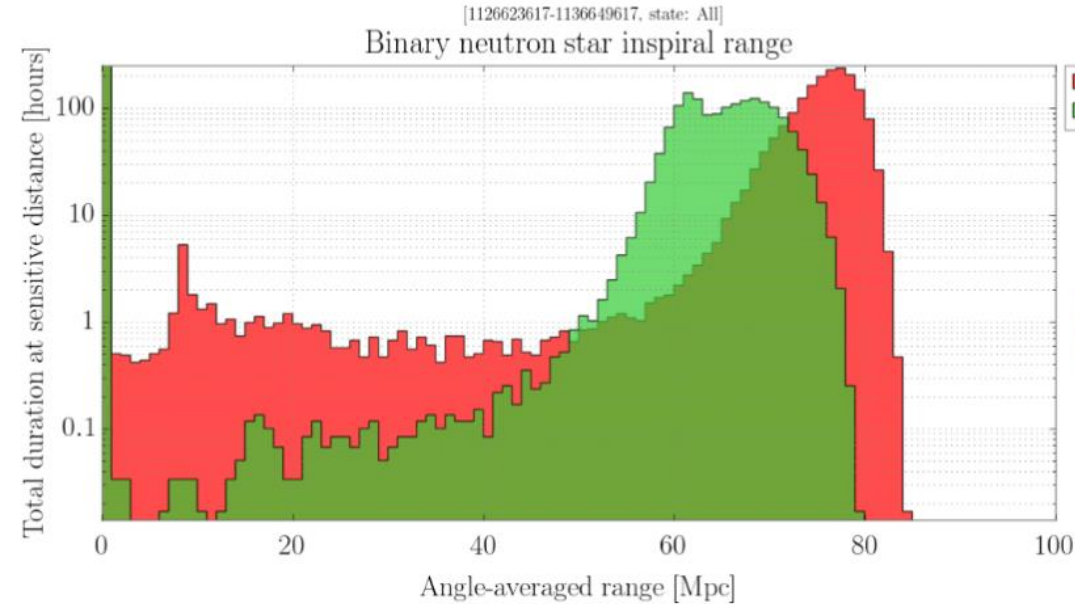
Advanced LIGO O2感度

- Hanfordでは入射光強度を20Wから50Wに増やすもノイズが悪化、30W入射に
- Livingstonでは散乱光雑音対策をし、低周波で感度を改善



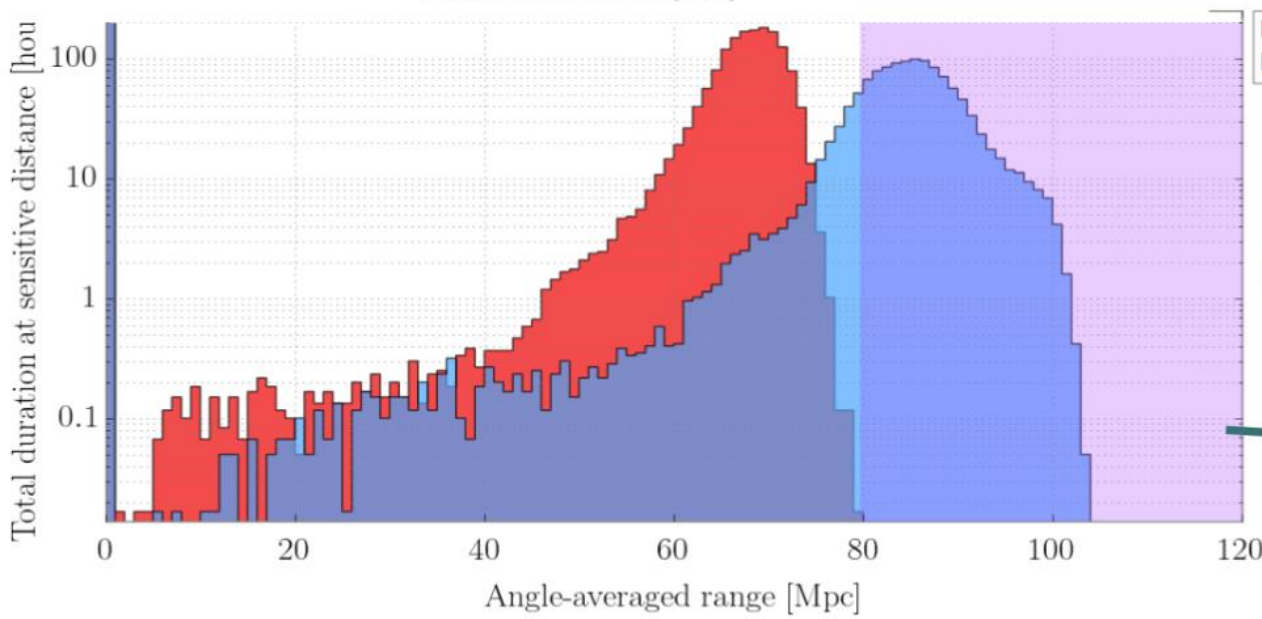
Advanced LIGOのInspiral Range

D. Sigg, [LIGO-G1700726](#)



O1

Volume-Time product now about the same for O1 & O2



O2

Goal was 80-120 Mpc