

重力波実験の現状と展望

大阪市立大学理学研究科 神田展行

on behalf of KAGRA collaboration (for KAGRA part)

2017/9/12

日本物理学会2017年秋季大会, 宇都宮大学 (峰キャンパス)

■ 重力波検出の現在

連星ブラックホール合体の発見

LIGO, Virgo Observational Run (O2)

KAGRA

■ 地下へ潜ろう！

なぜ地下なのか？

■ (地下からの)重力波検出の将来

3rd Generation Detectors

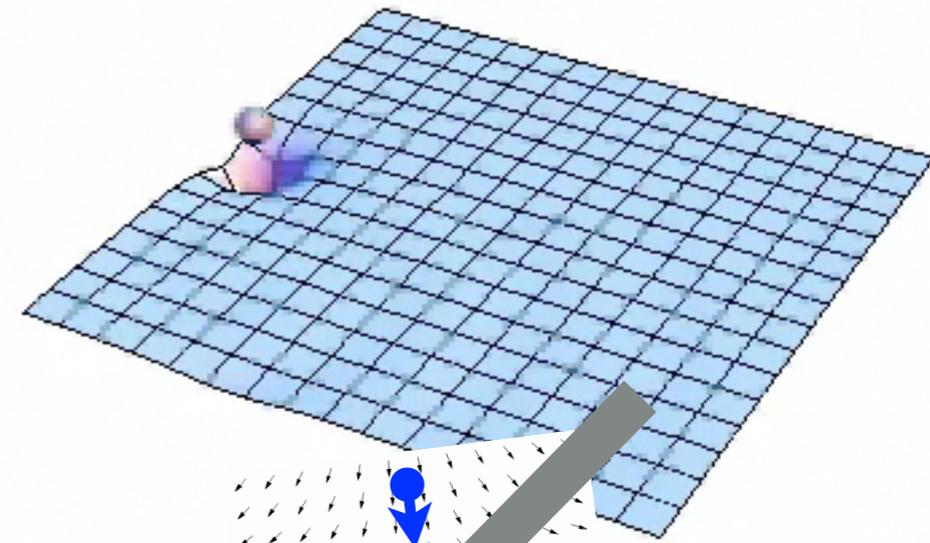
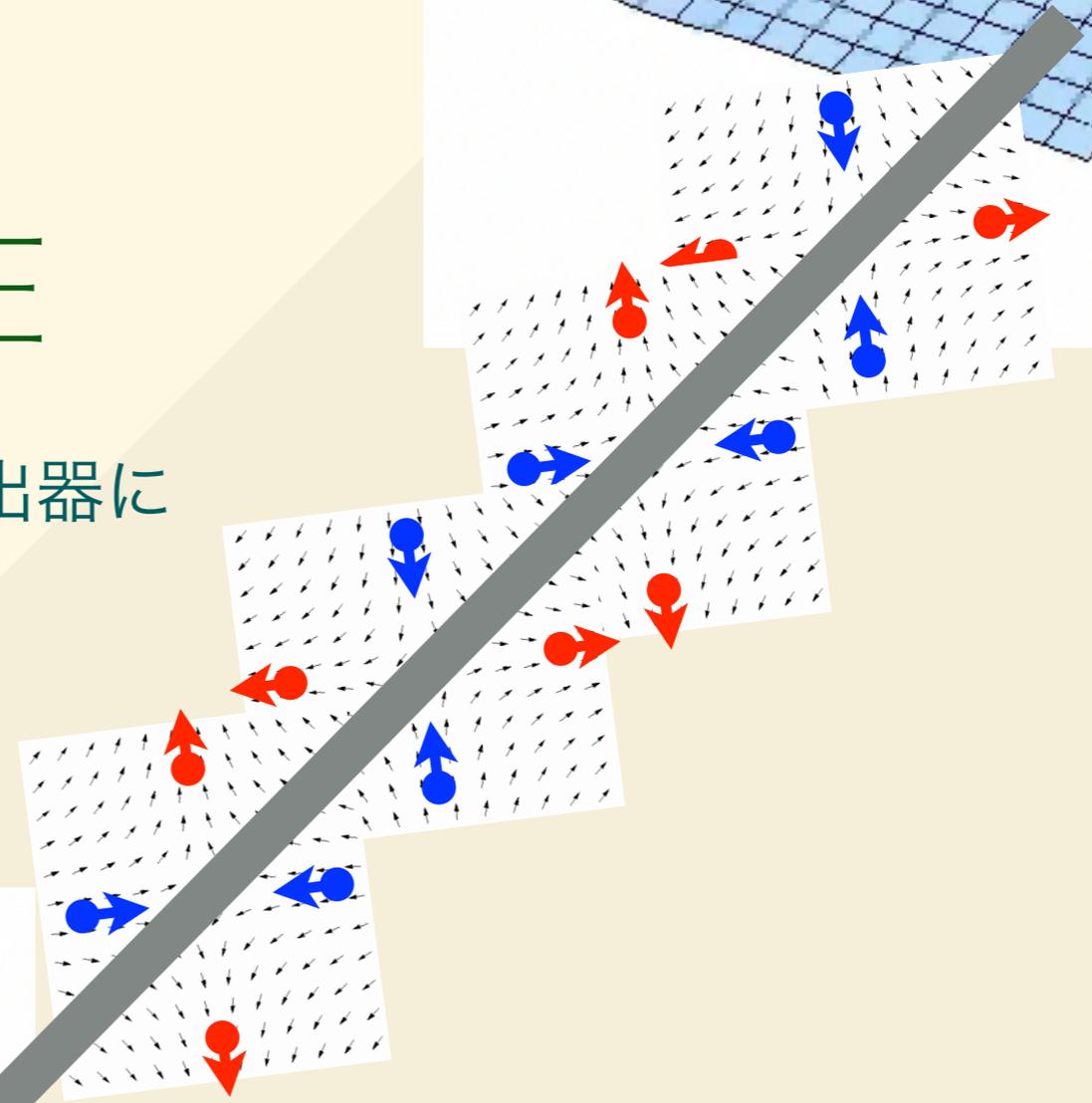
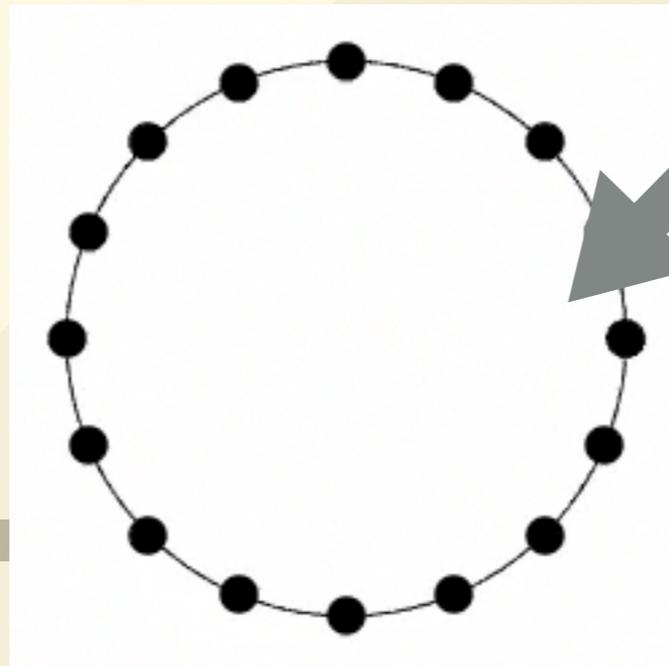
Einstein Telescope

Cosmic Explorer

地下から宇宙の果てを見る

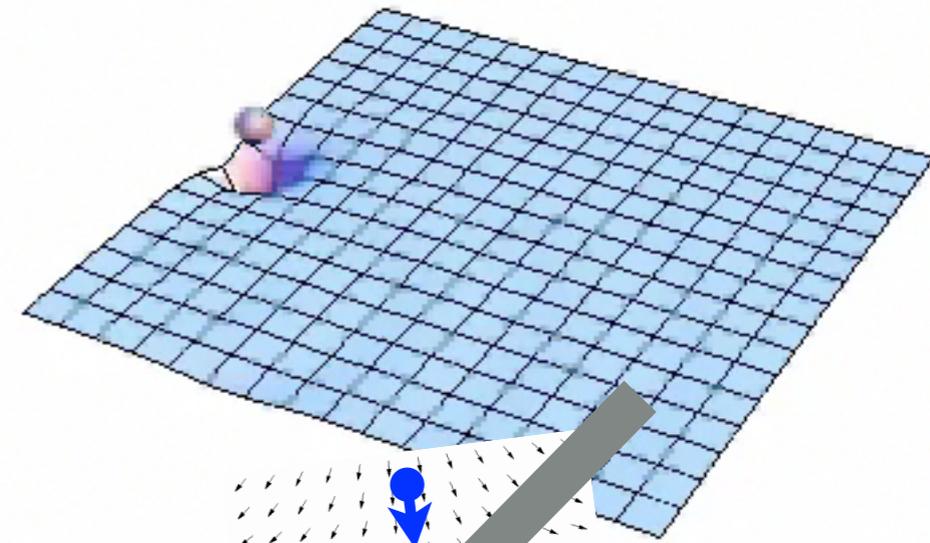
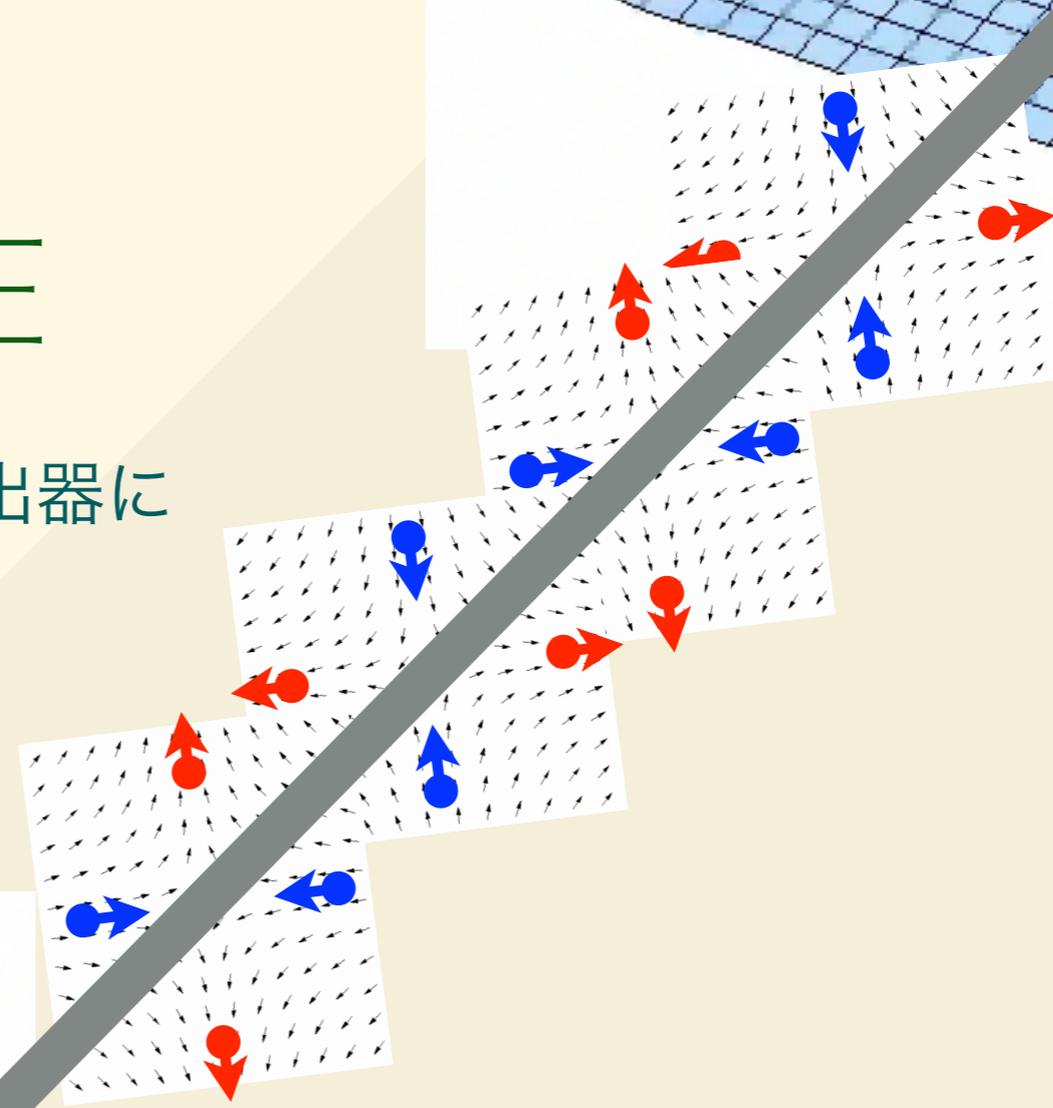
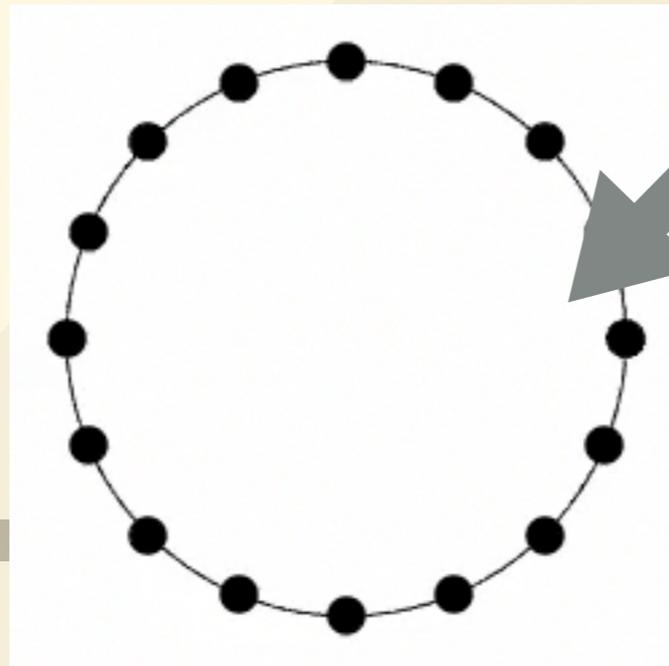
重力波検出の現在

地上設置のレーザー干渉計型重力波検出器により、天体起源の重力波が観測された。



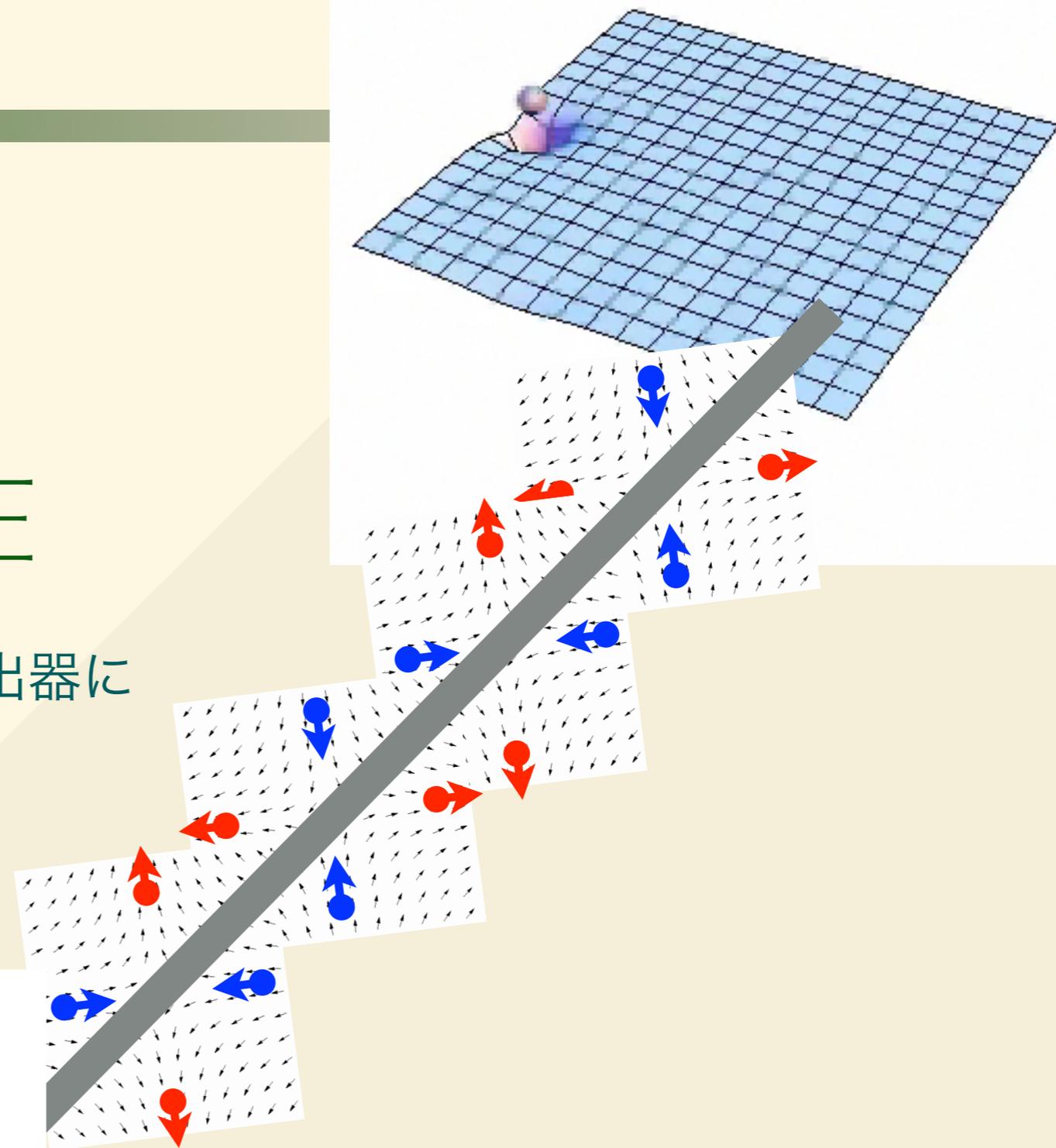
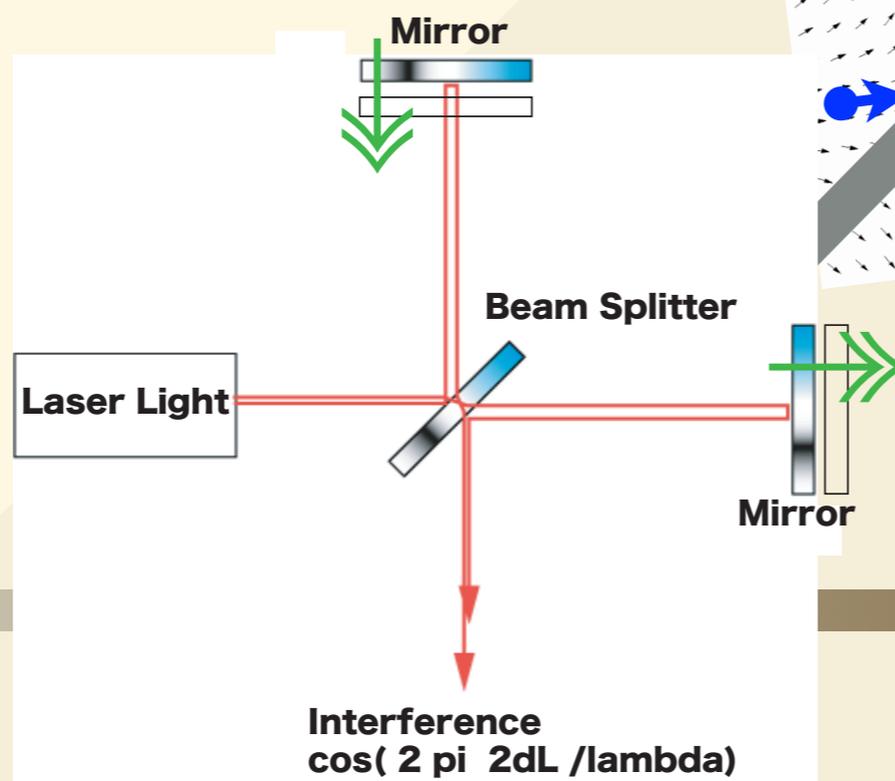
重力波検出の現在

地上設置のレーザー干渉計型重力波検出器により、天体起源の重力波が観測された。



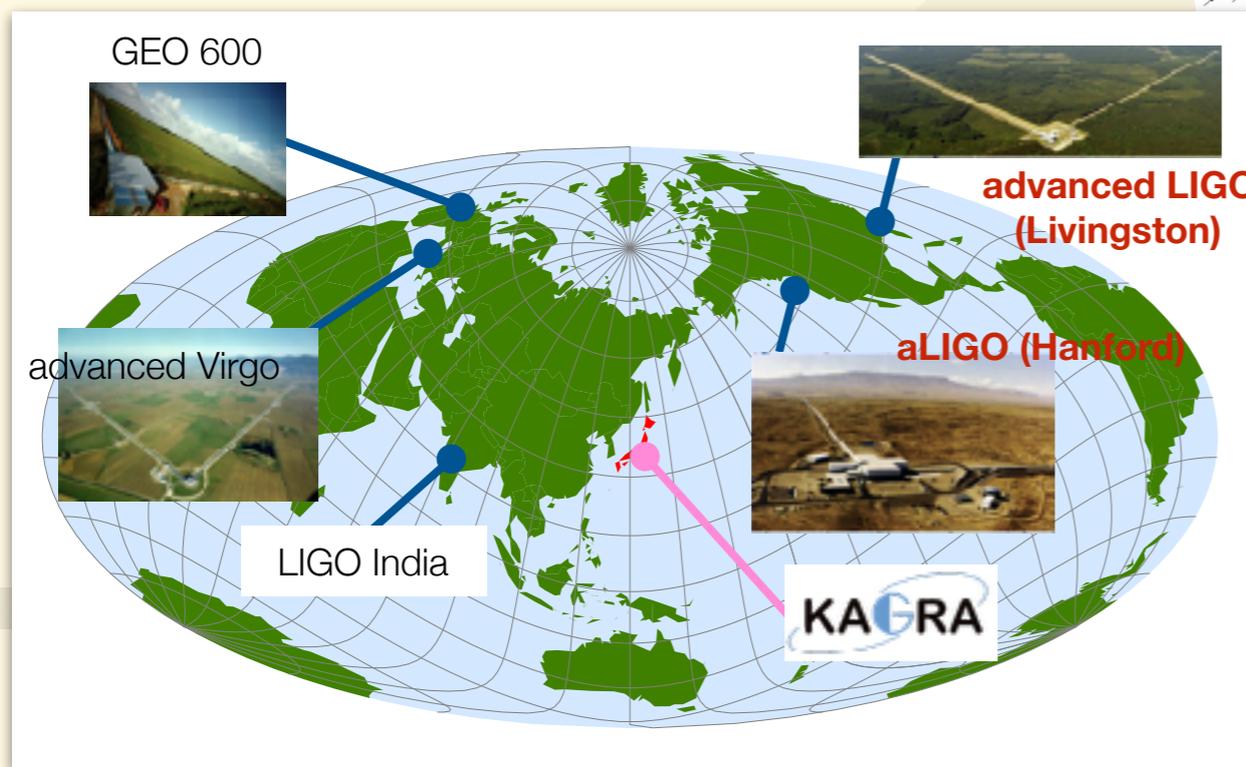
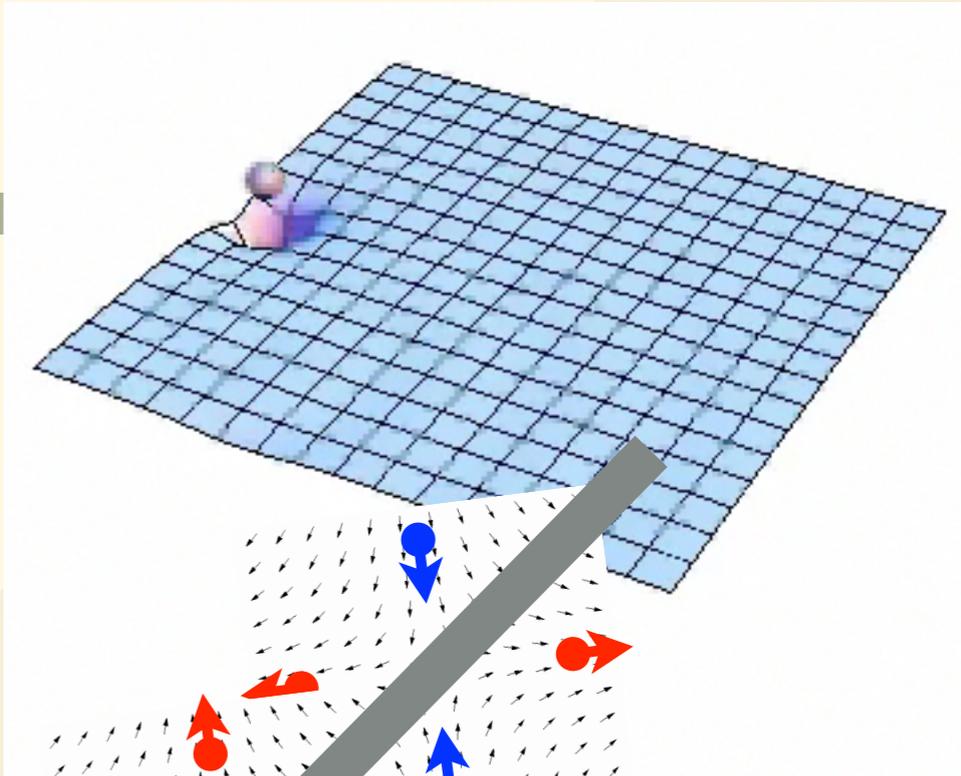
重力波検出の現在

地上設置のレーザー干渉計型重力波検出器により、天体起源の重力波が観測された。



重力波検出の現在

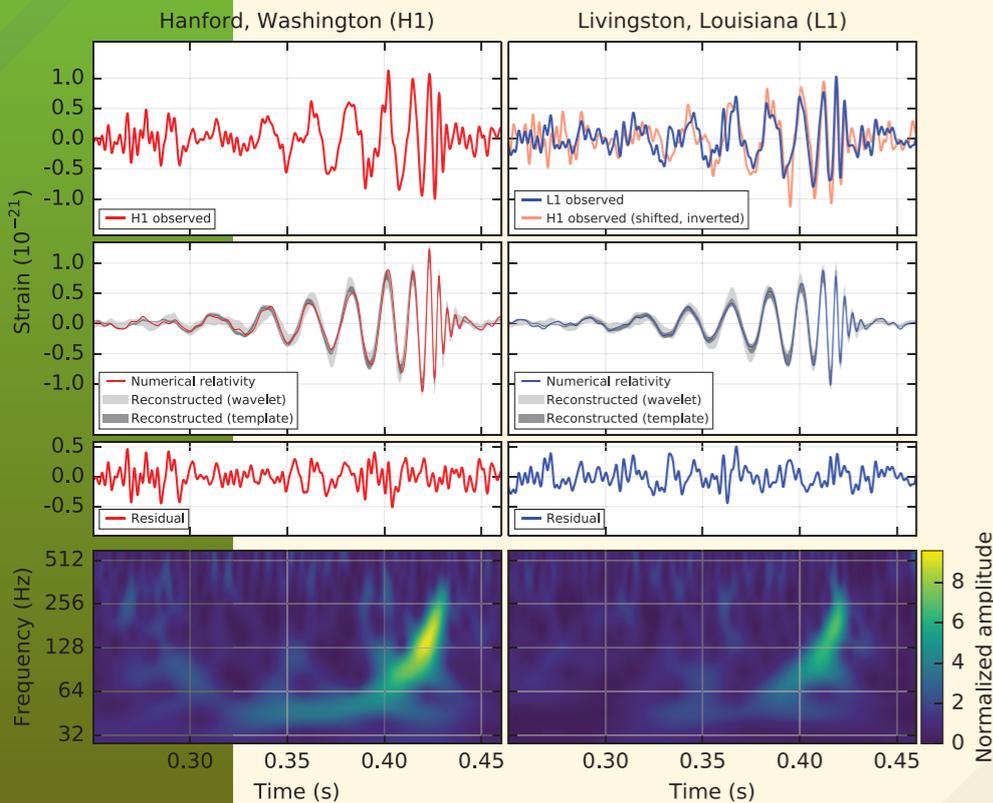
地上設置のレーザー干渉計型重力波検出器により、天体起源の重力波が観測された。



ブラックホール連星合体の発見

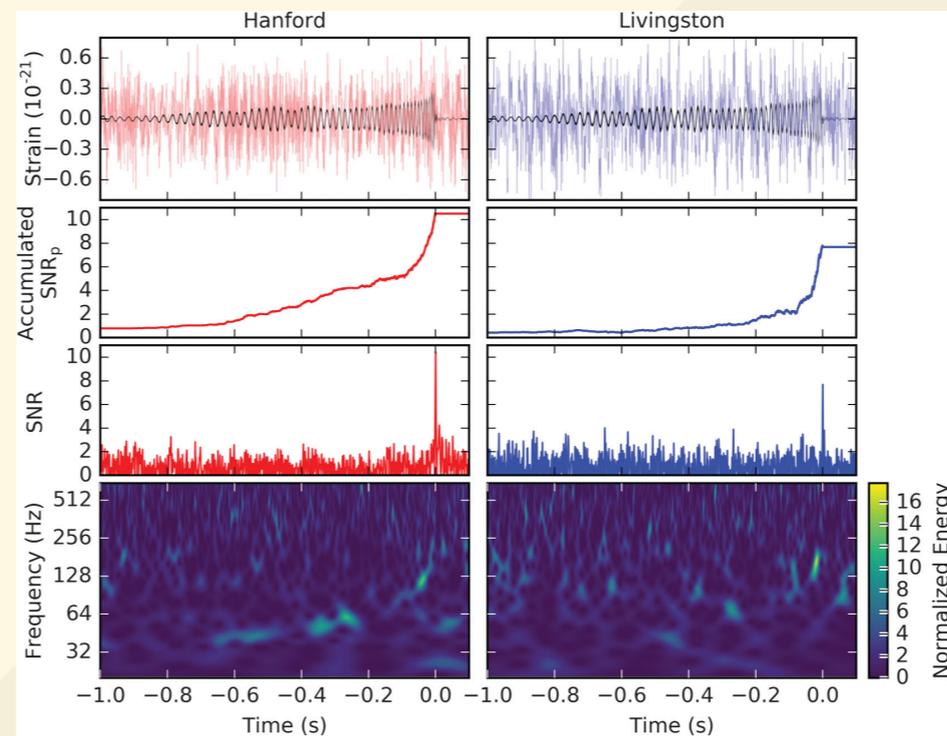
初観測重力波は、大質量ブラックホール連星(Binary Black-Hole : BBH)合体が源

いままで公開されているLIGOの検出の3例はすべてBBH



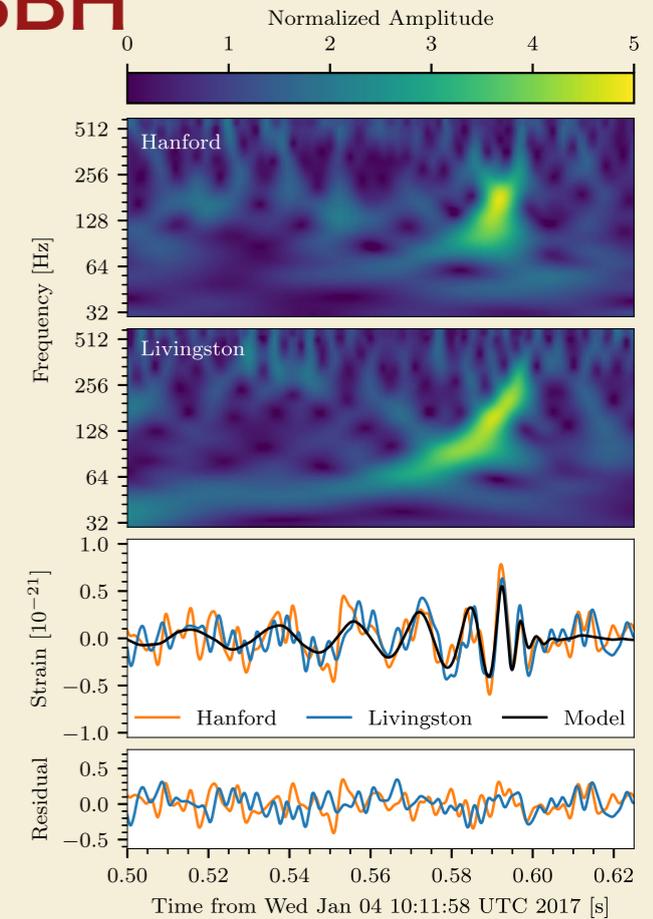
GW150914

簡単な周波数バンドパスフィルターを通したただけで目視できる。



GW151226

マッチドフィルター解析の強力さを示す好例
目視は無理。



GW170104

解析結果を知っていれば、目視できる。

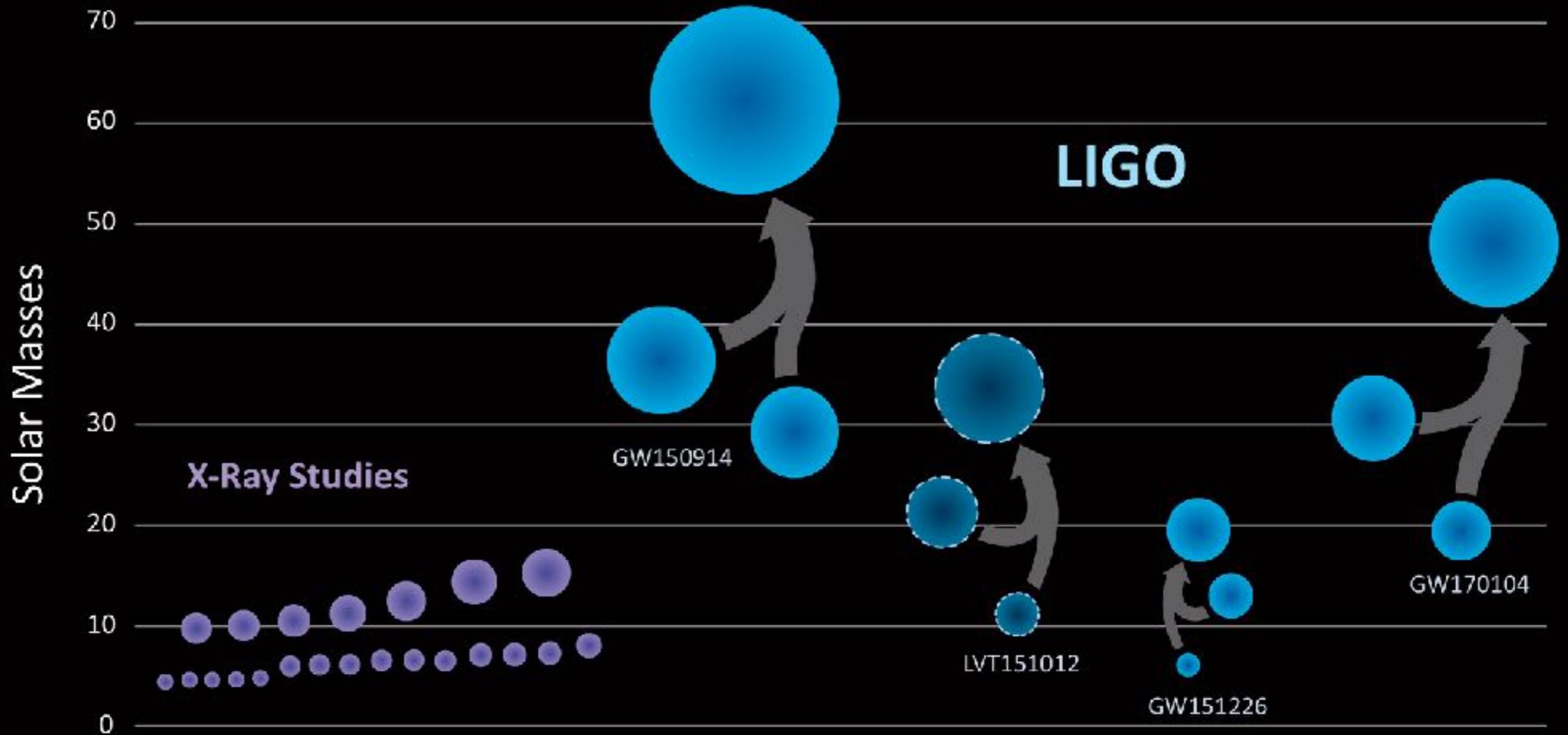
Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio ρ	23.7	13.0	9.7
False alarm rate FAR/yr ⁻¹	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	7.5×10^{-8}	7.5×10^{-8}	0.045
Significance	$> 5.3 \sigma$	$> 5.3 \sigma$	1.7σ
Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	23^{+18}_{-6}
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	13^{+4}_{-5}
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	37^{+13}_{-4}
Effective inspiral spin χ_{eff}	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	35^{+14}_{-4}
Final spin a_f	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
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

GW170104

Primary black hole mass m_1	$31.2^{+8.4}_{-6.0} M_\odot$
Secondary black hole mass m_2	$19.4^{+5.3}_{-5.9} M_\odot$
Chirp mass \mathcal{M}	$21.1^{+2.4}_{-2.7} M_\odot$
Total mass M	$50.7^{+5.9}_{-5.0} M_\odot$
Final black hole mass M_f	$48.7^{+5.7}_{-4.6} M_\odot$
Radiated energy E_{rad}	$2.0^{+0.6}_{-0.7} M_\odot c^2$
Peak luminosity ℓ_{peak}	$3.1^{+0.7}_{-1.3} \times 10^{56} \text{ erg s}^{-1}$
Effective inspiral spin parameter χ_{eff}	$-0.12^{+0.21}_{-0.30}$
Final black hole spin a_f	$0.64^{+0.09}_{-0.20}$
Luminosity distance D_L	$880^{+450}_{-390} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.18^{+0.08}_{-0.07}$

sky localization $\sim 1200 \text{ deg}^2$

Black Holes of Known Mass



LIGO, Virgo Observing Run (O2)

- 2016/11/30 : O2 start
- 2017/1/4 : 3rd detection = GW170104
- 2017/8/1 : Advanced Virgo joined
- 2017/8/25 : O2 end



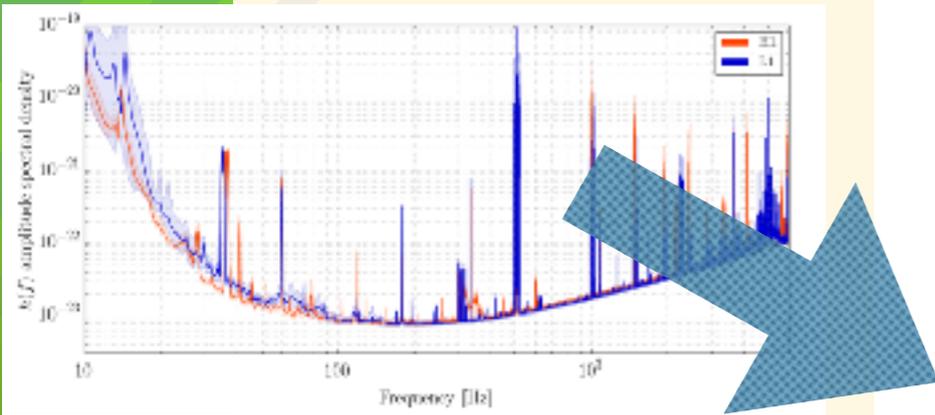
Virgo



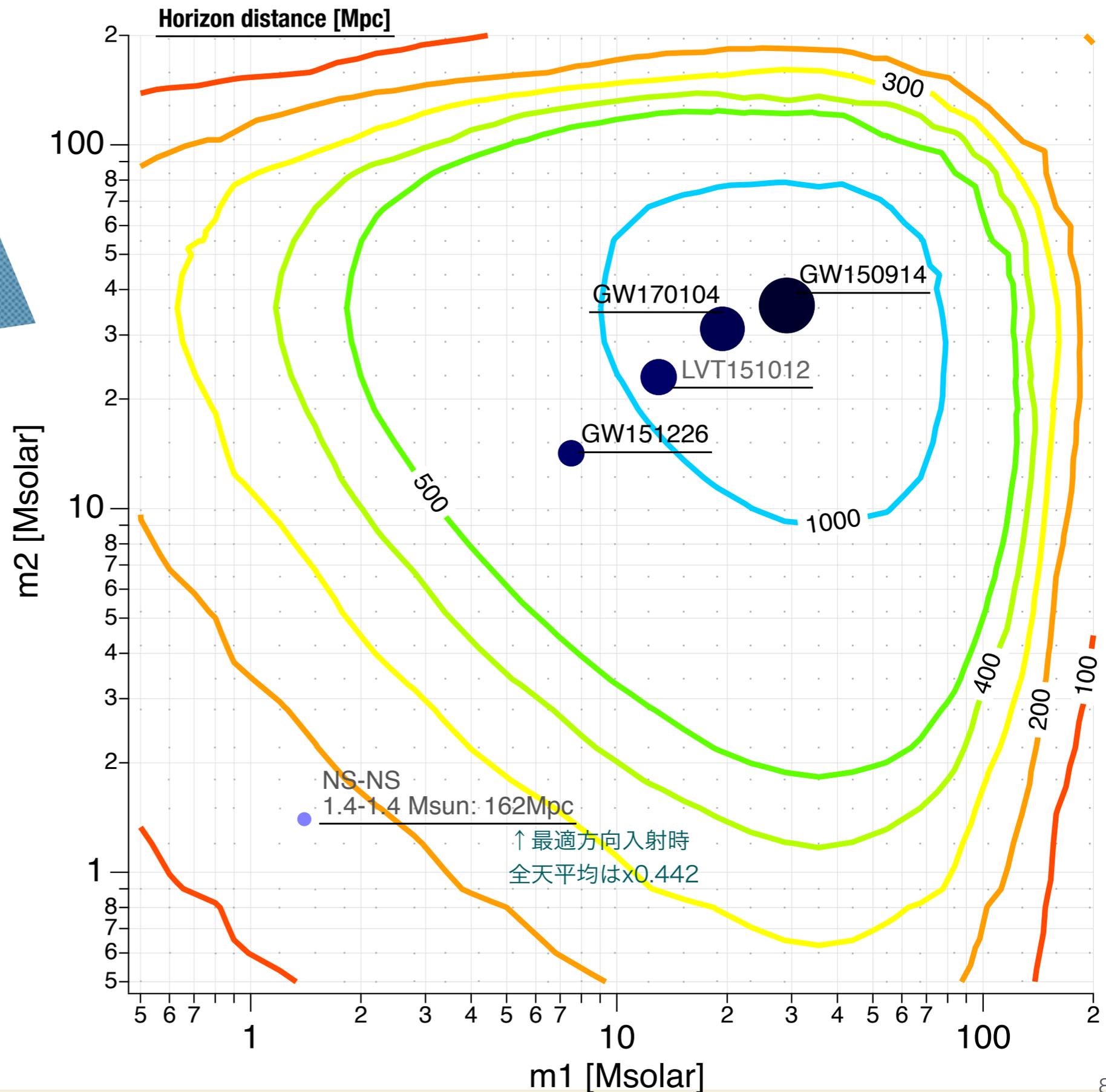
LIGO (Hanford)

検出レンジと質量

Example : LIGO O1



検出レンジ
は、感度曲線
と連星の質量
に依存。

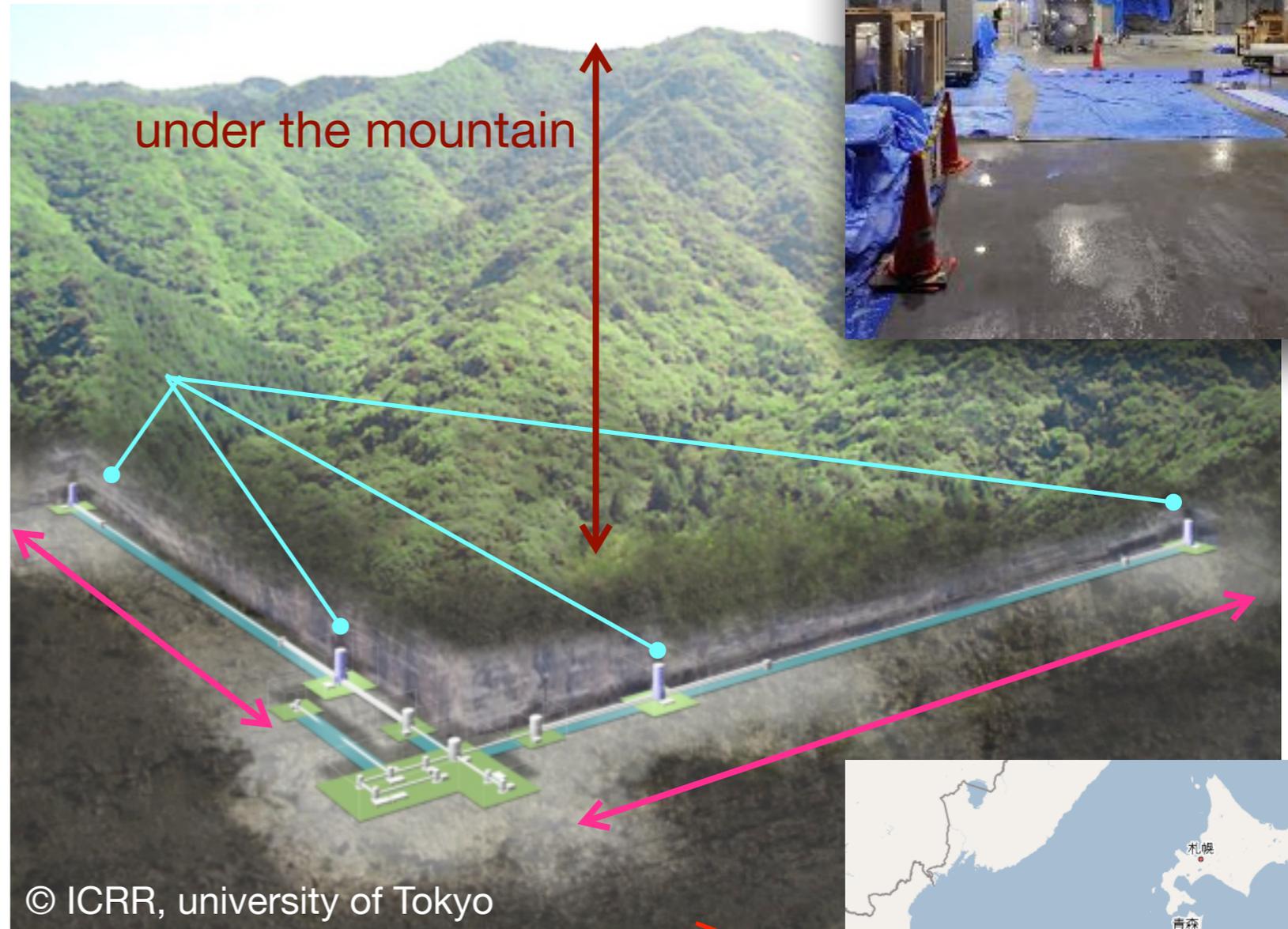


KAGRA



~280 persons (>80 affiliations)

- ▶ Underground
 - ▶ Kamioka mine
 - ▶ **Silent and Stable**
- ▶ Cryogenic mirror
 - ▶ 20K
 - ▶ **Sapphire substrate**
- ▶ 3km baseline

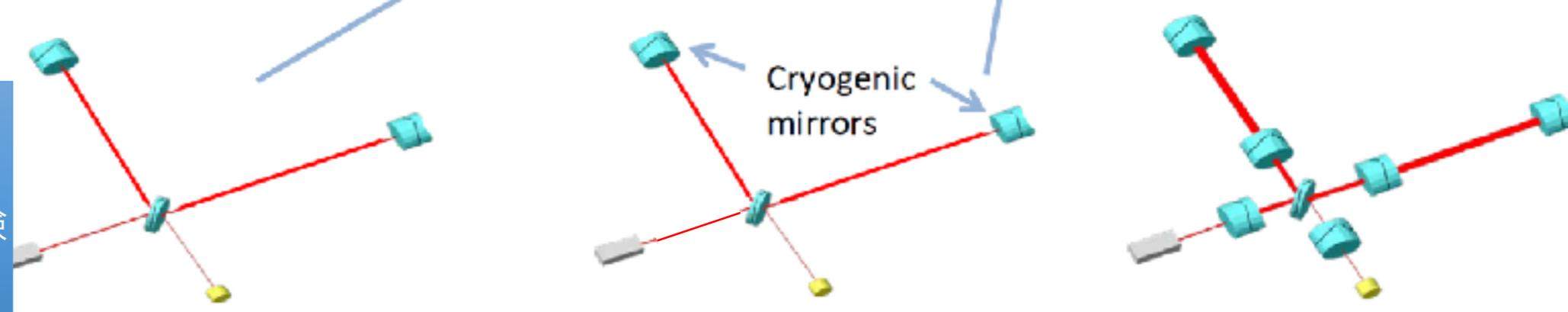
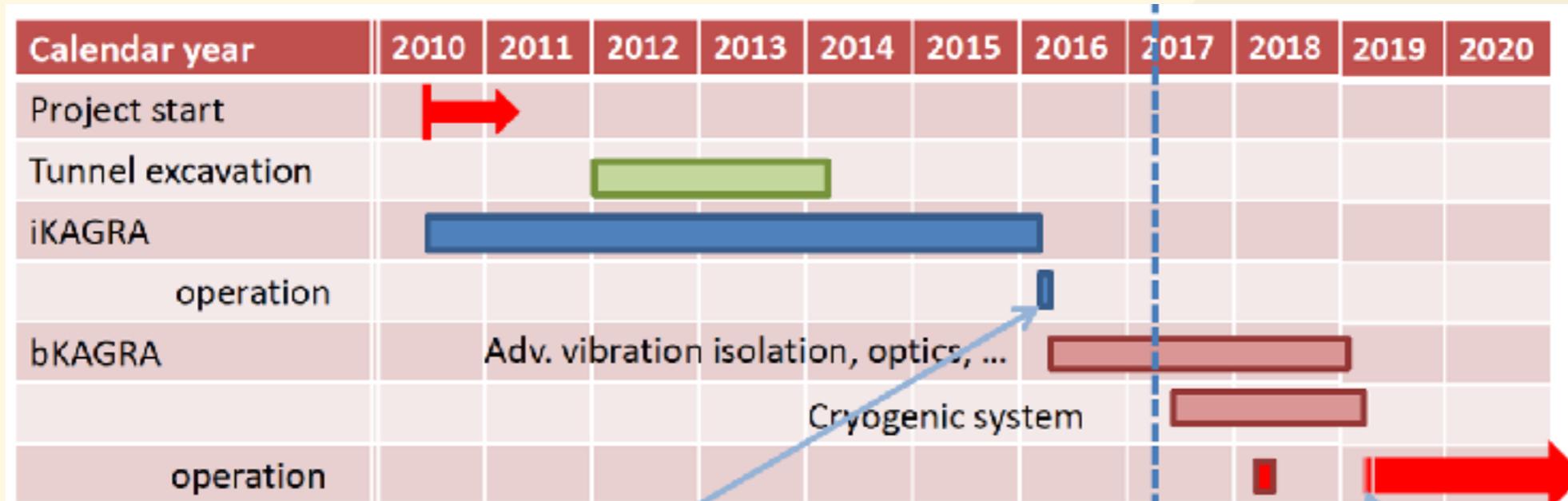


- ▶ Schedule
 - ▶ 2010 : Construction start
 - ▶ early 2016 : 1st operation in normal temperature
 - ▶ early 2018 : cryogenic operation



KAGRAの現状

ロードマップ



Initial KAGRA
室温マイケルソン干渉計
2016年3-4月に2週間の試験
運転を完遂

iKAGRA

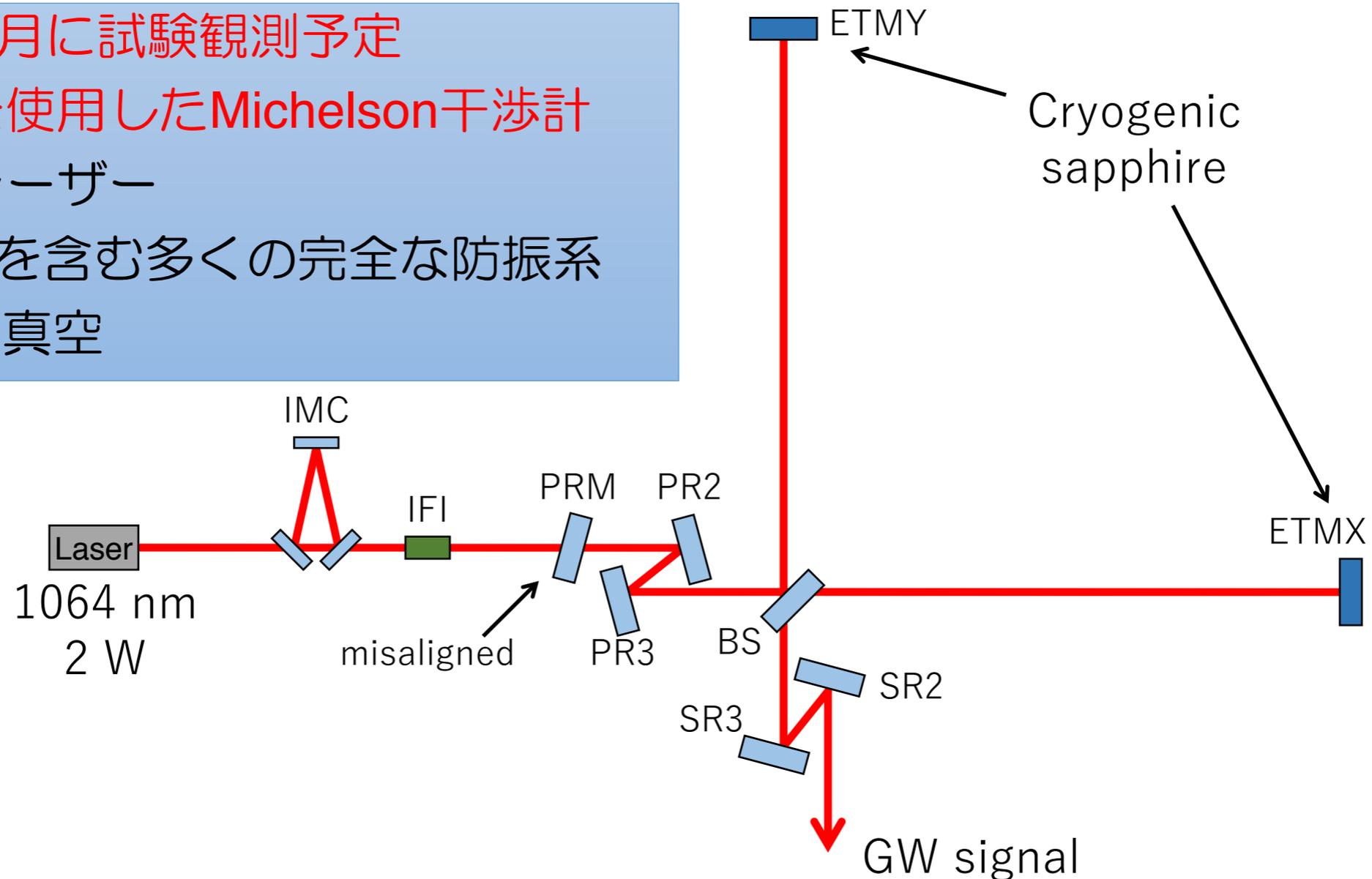
bKAGRA Phase 1
低温マイケルソン干渉計
2018/3 試験運転

bKAGRA Phase 2
低温RSE干渉計

bKAGRA Phase 3
低温RSE干渉計
感度改善
観測運転開始

現在建設中：bKAGRA Phase 1

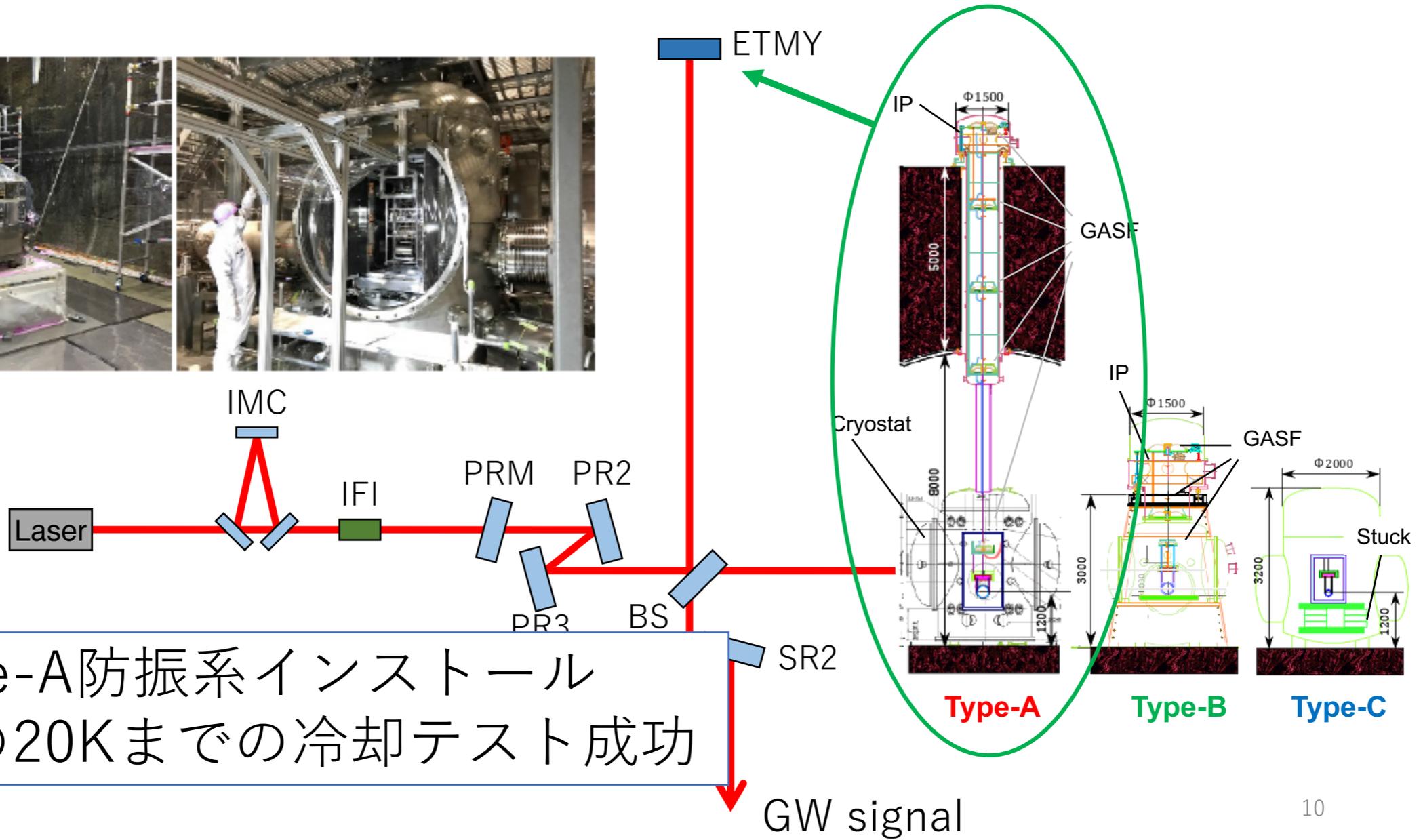
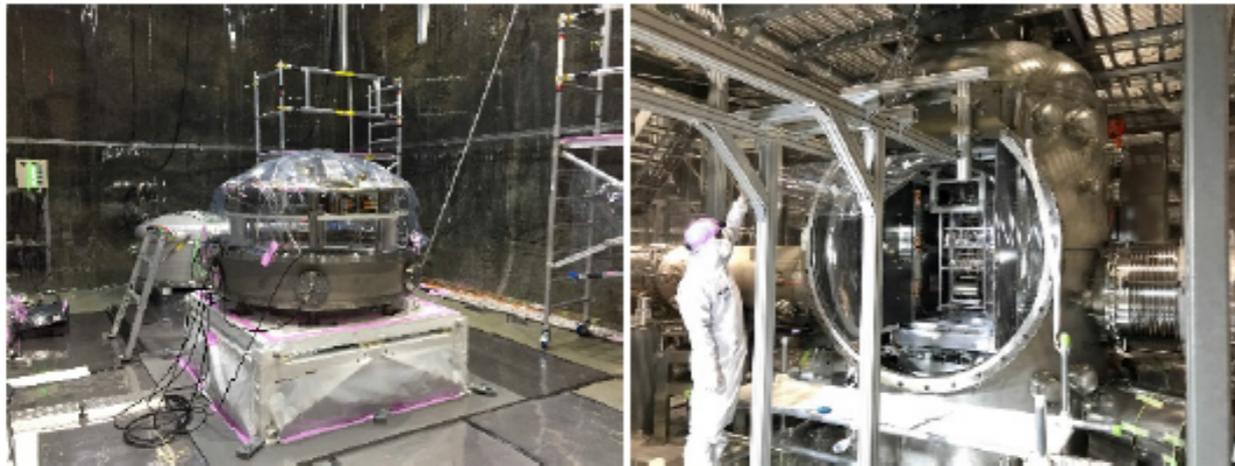
- 2018年3月に試験観測予定
- 低温鏡を使用したMichelson干渉計
- 低出力レーザー
- ETMX/Yを含む多くの完全な防振系
- 10^{-6} Paの真空



9

重力波(KAGRA)セッション：13aS35, 13pU34, 15aU31
KAGRAステータストーク13aS35-1 山元(ICRR)

現在建設中：bKAGRA Phase 1

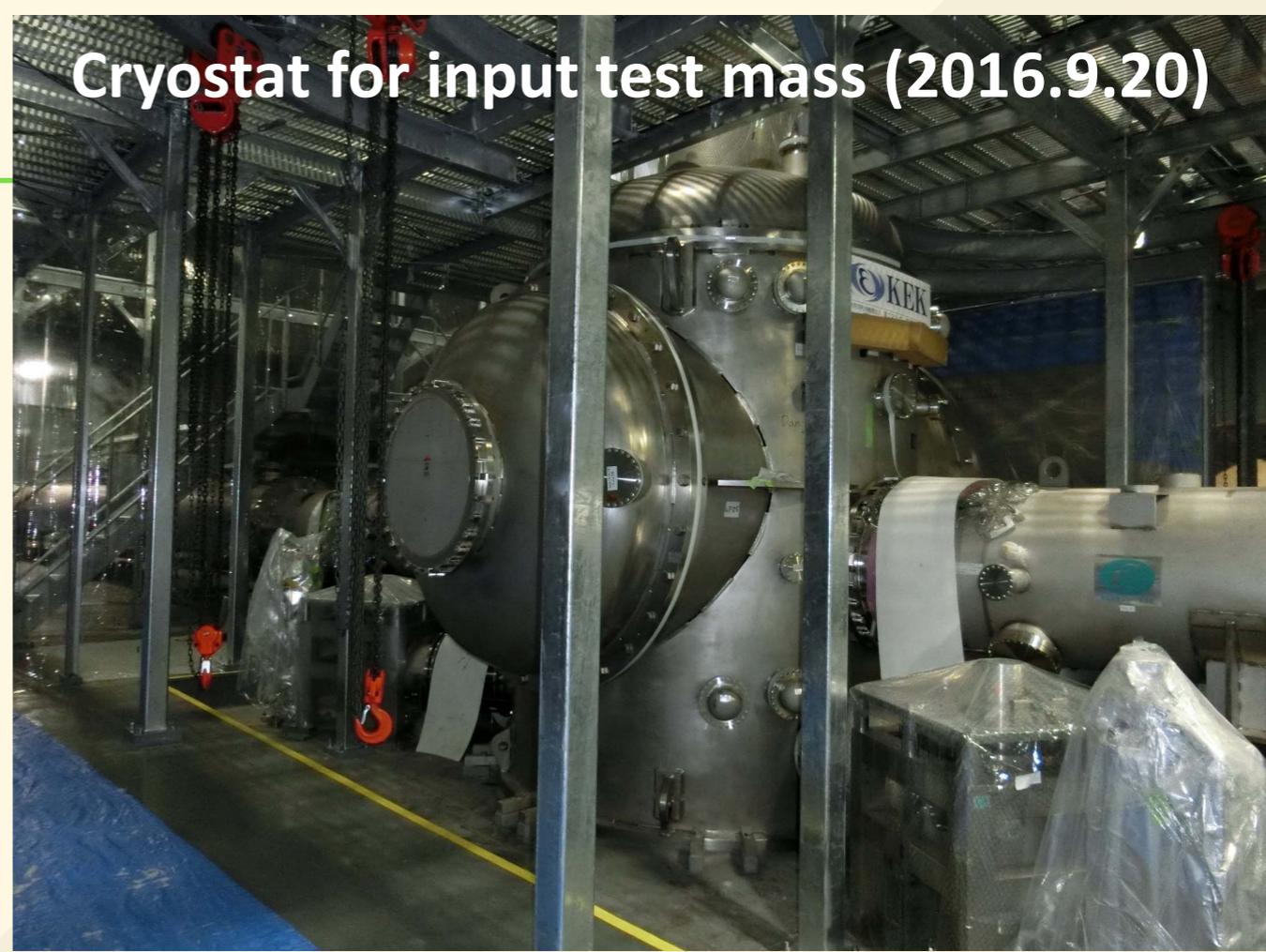


6/9: Type-A防振系インストール
 8/24 鏡の20Kまでの冷却テスト成功

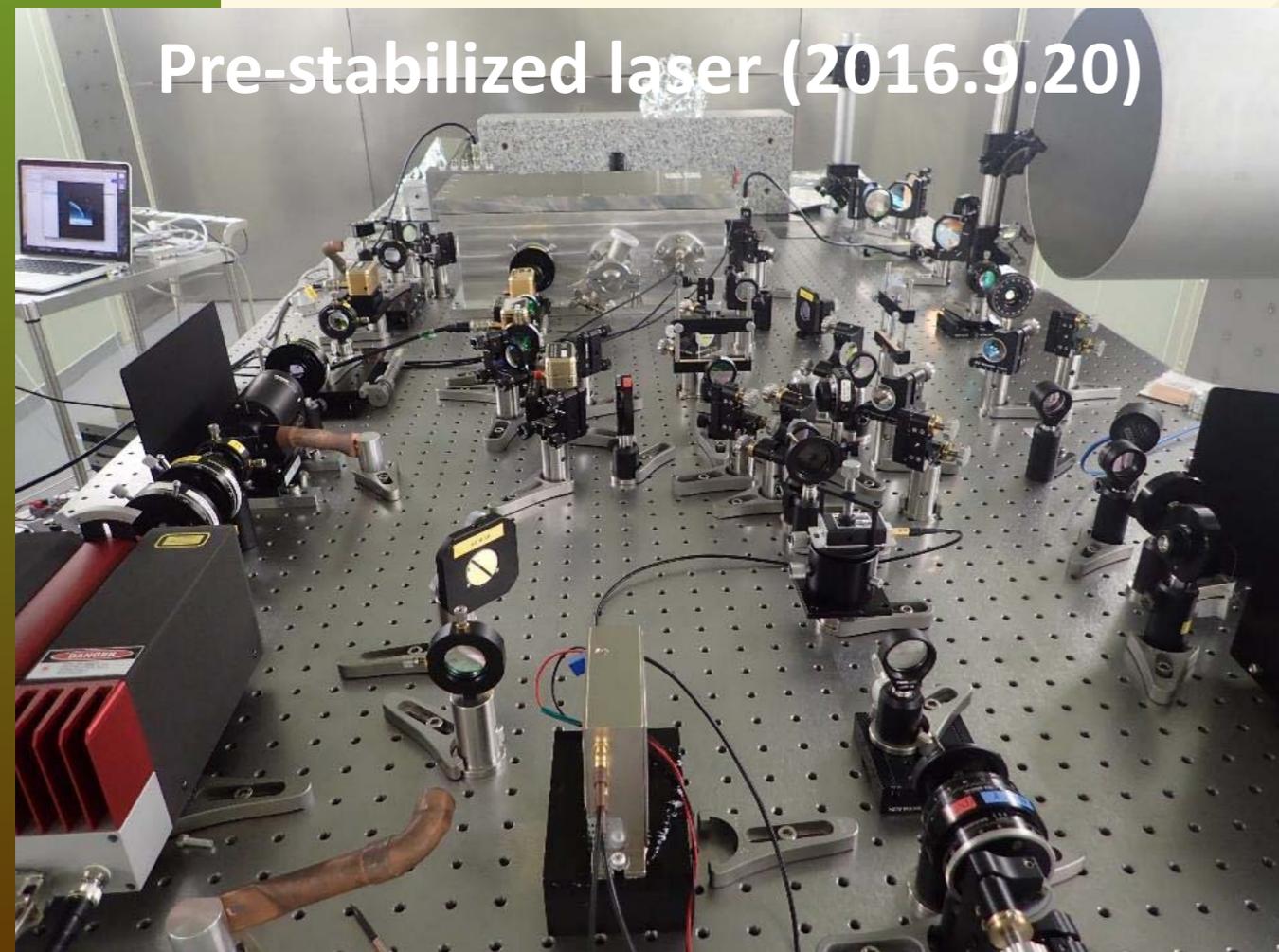
Central area (2017.1.7)



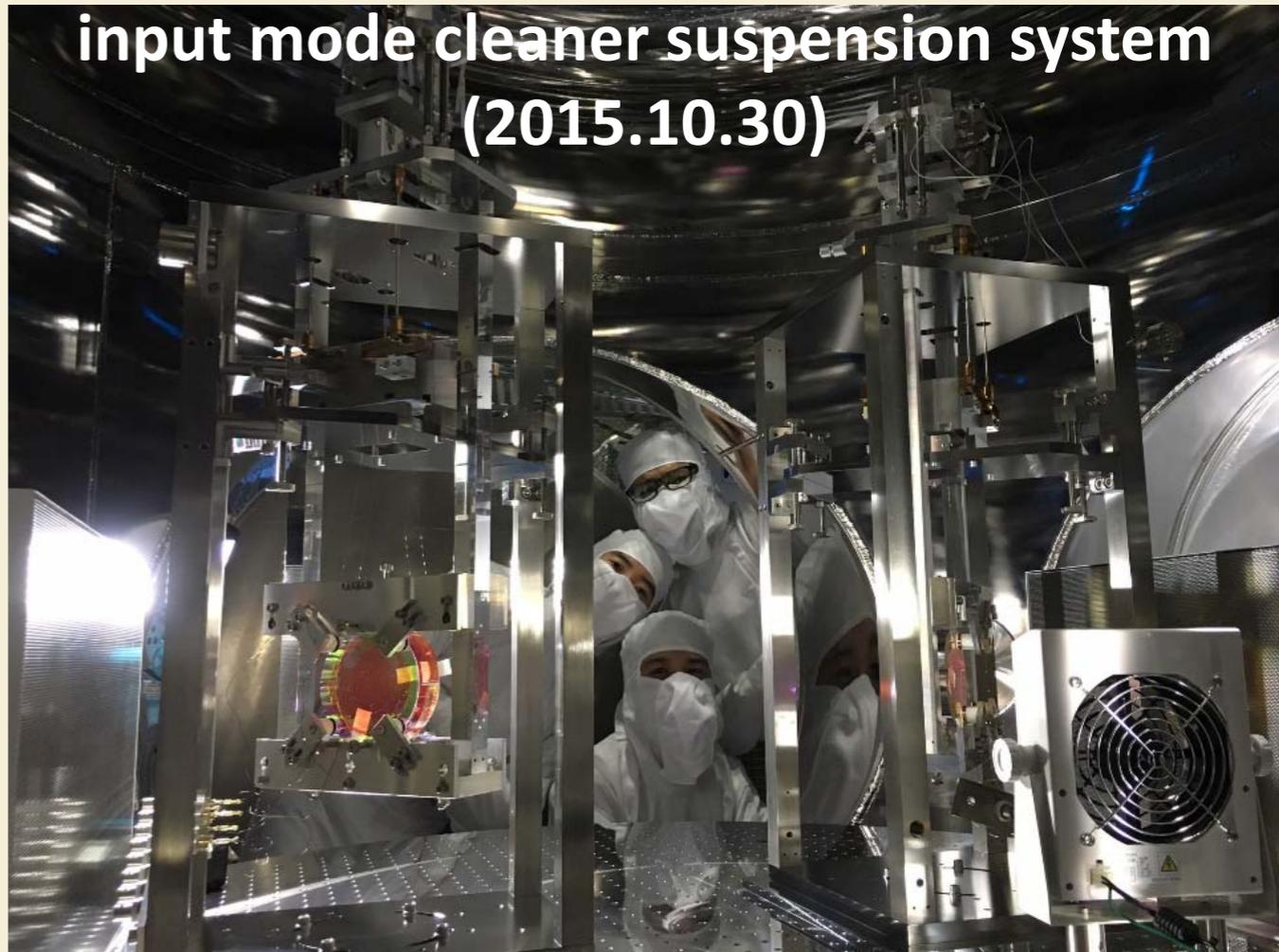
Cryostat for input test mass (2016.9.20)



Pre-stabilized laser (2016.9.20)

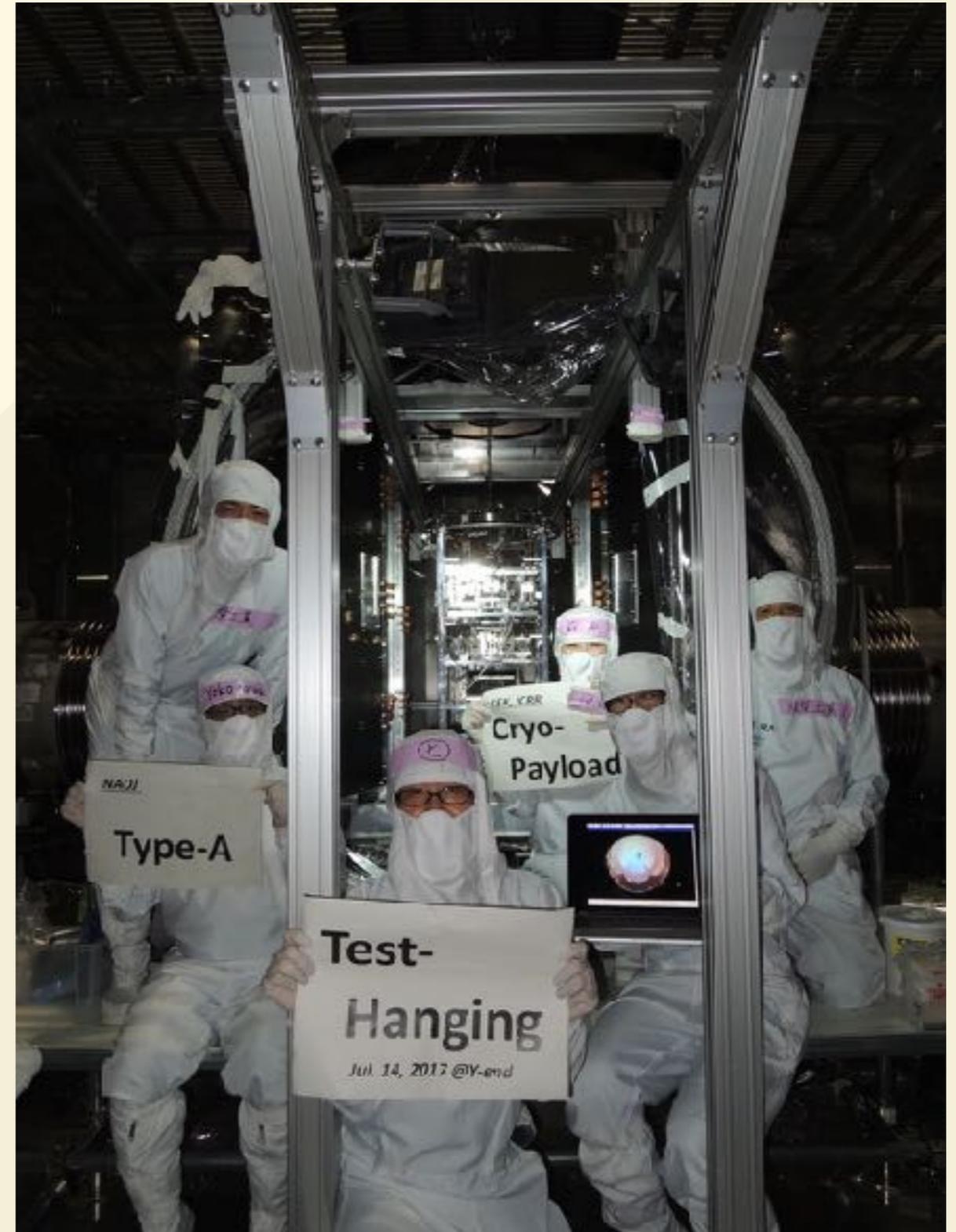
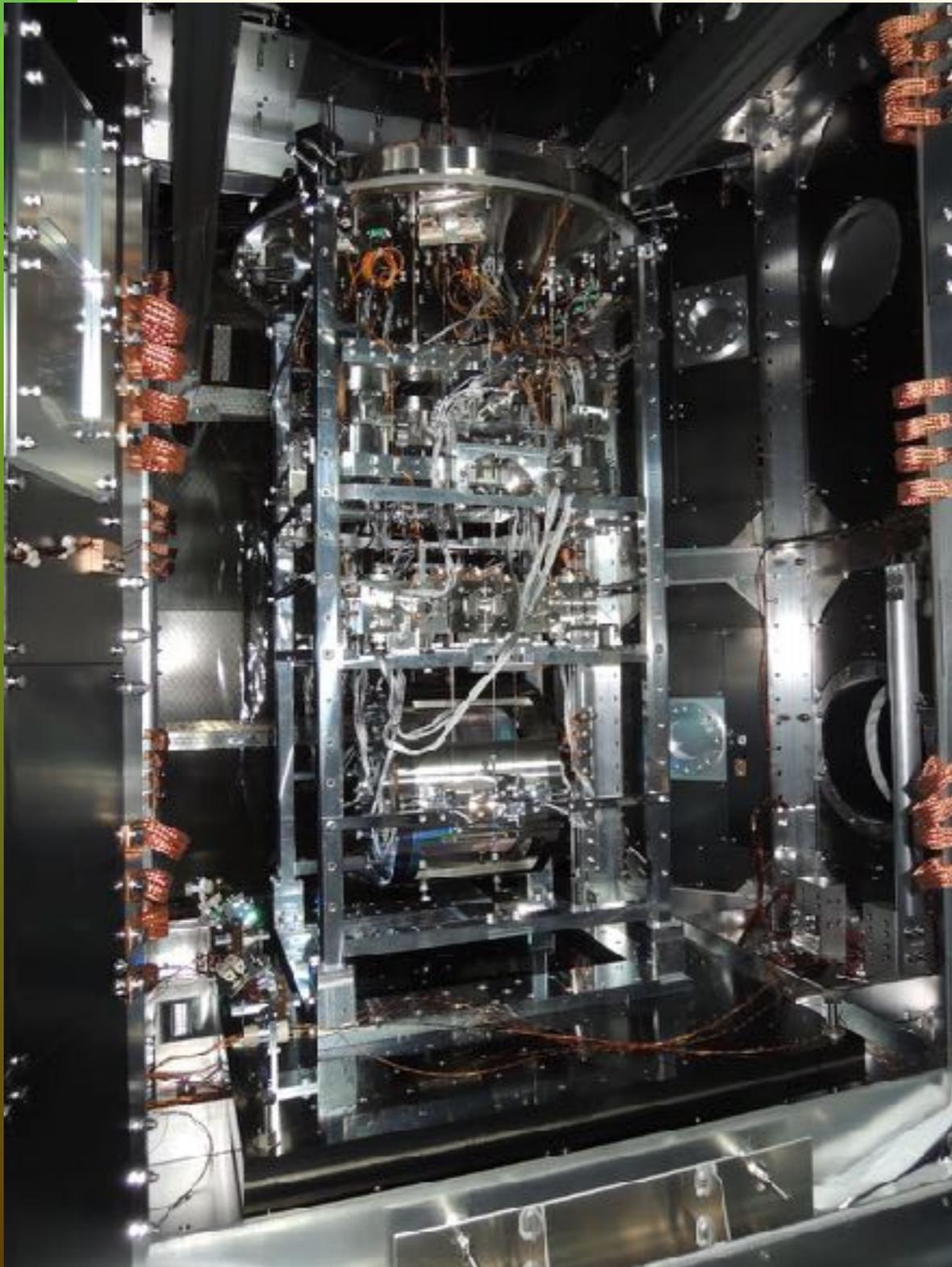


input mode cleaner suspension system (2015.10.30)

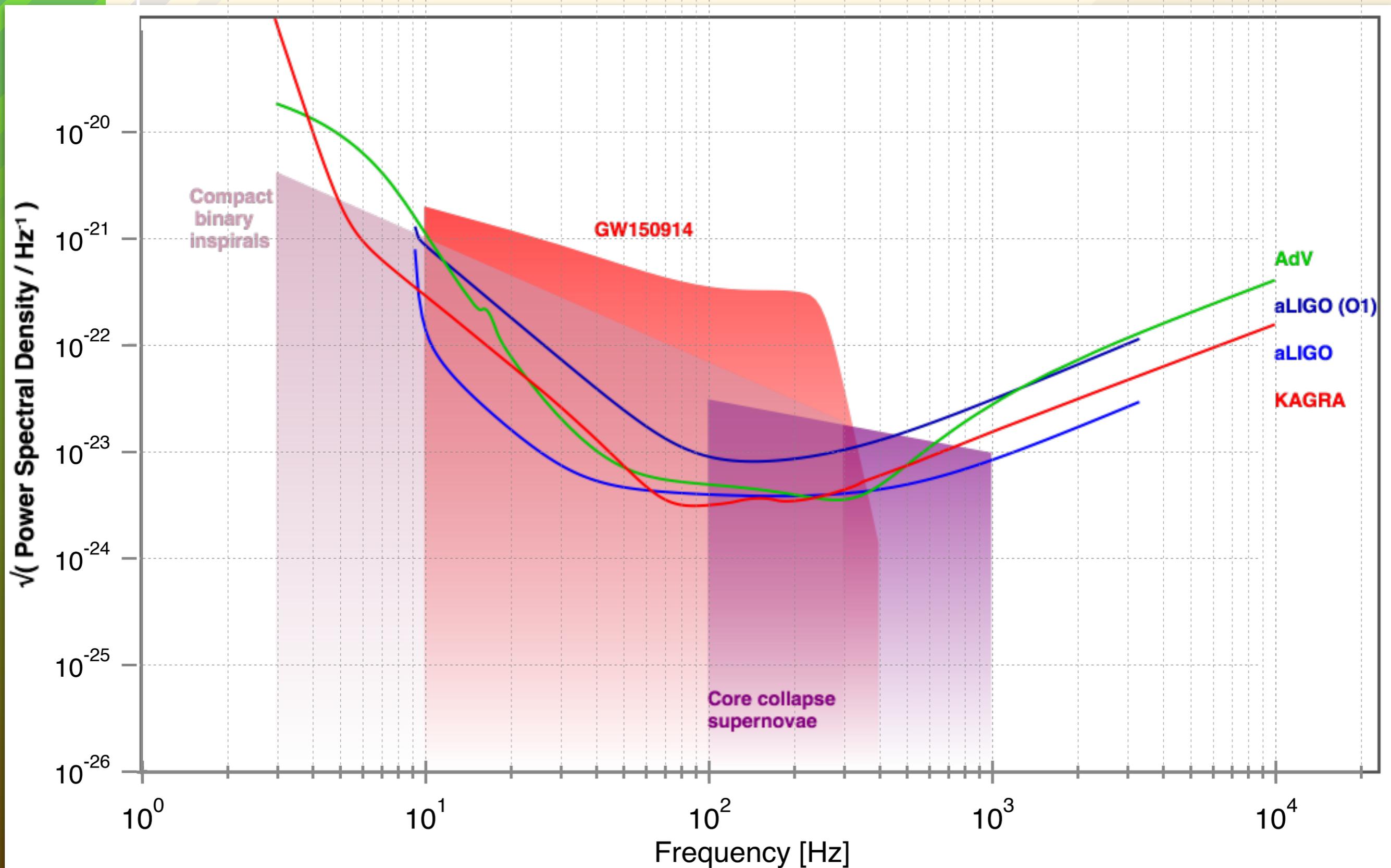


Cryo-Payload

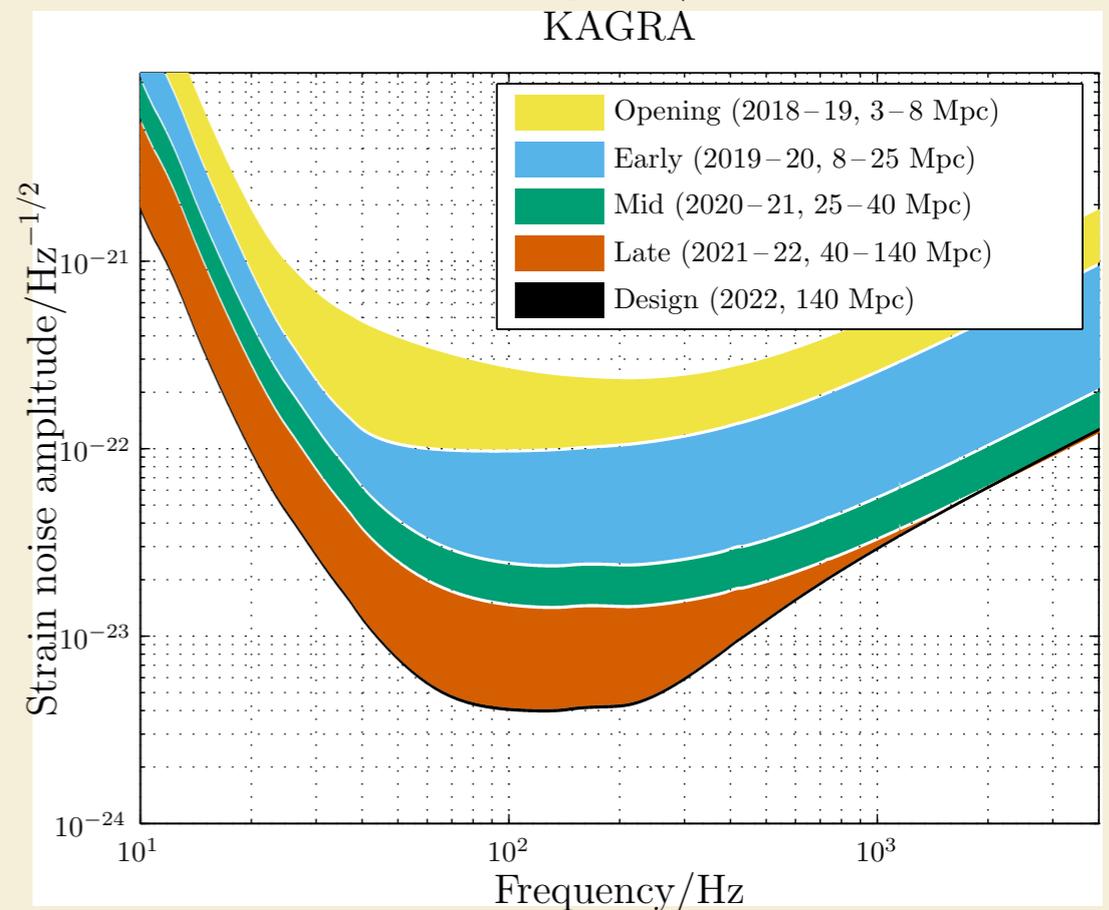
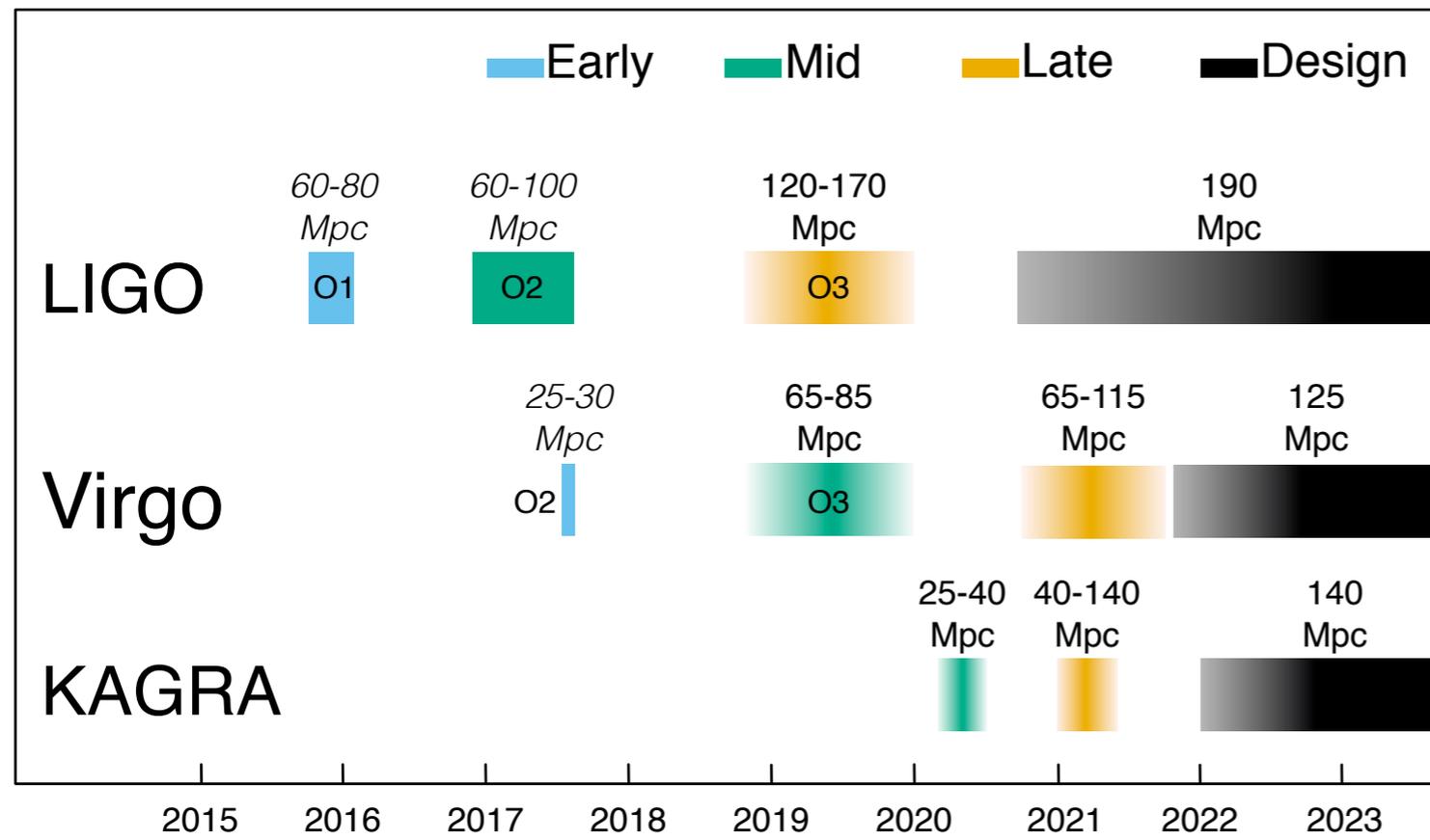
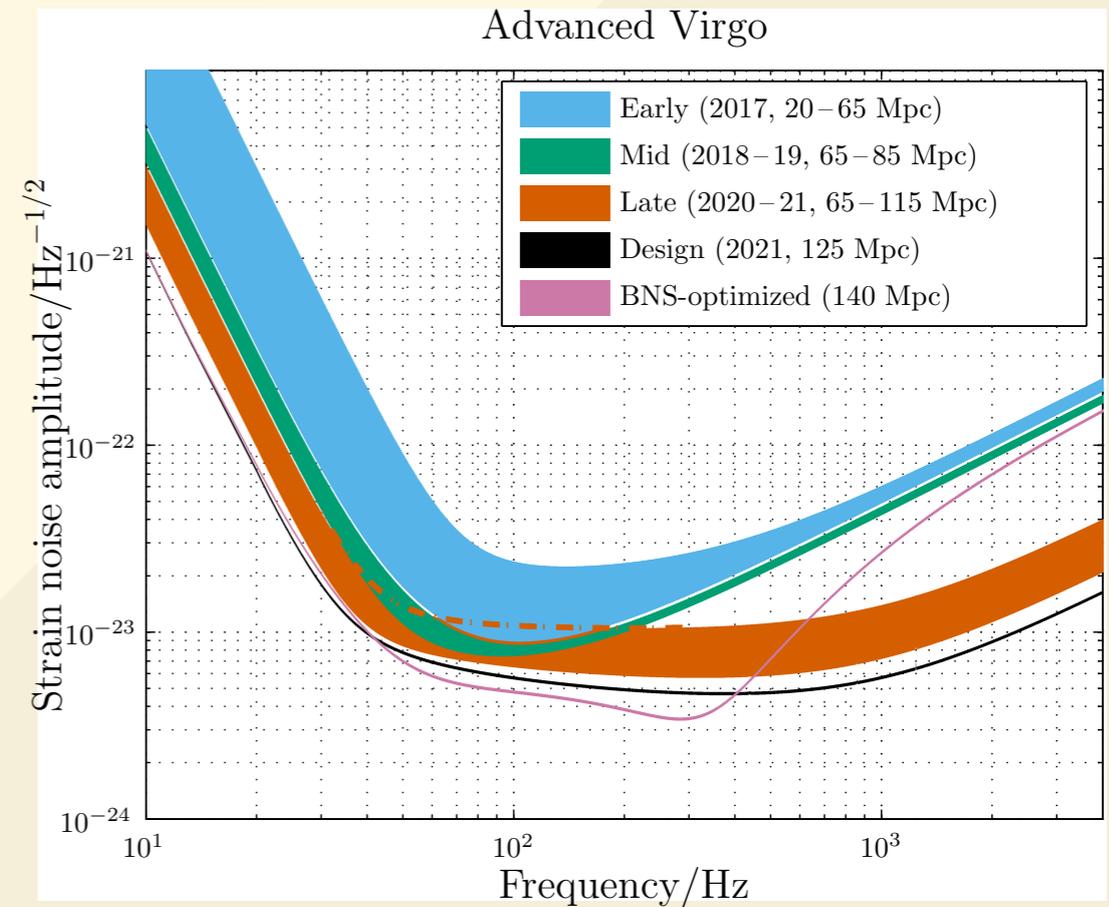
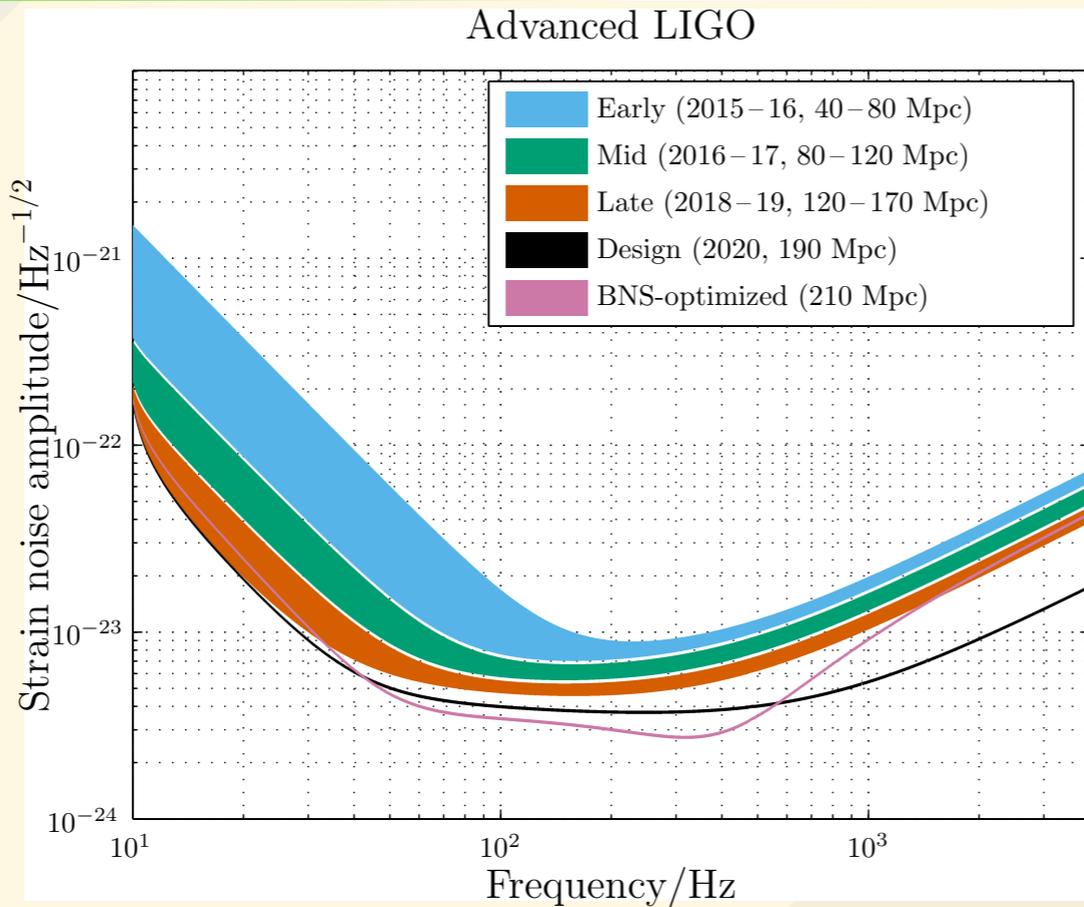
Cryo-Payload installed,
Also sapphire test bulk is cooling-down ~15K.



2G(第2世代)レーザー干渉計型重力波検出器



<http://rhcole.com/apps/GWplotter/>



地下へ潜ろう！

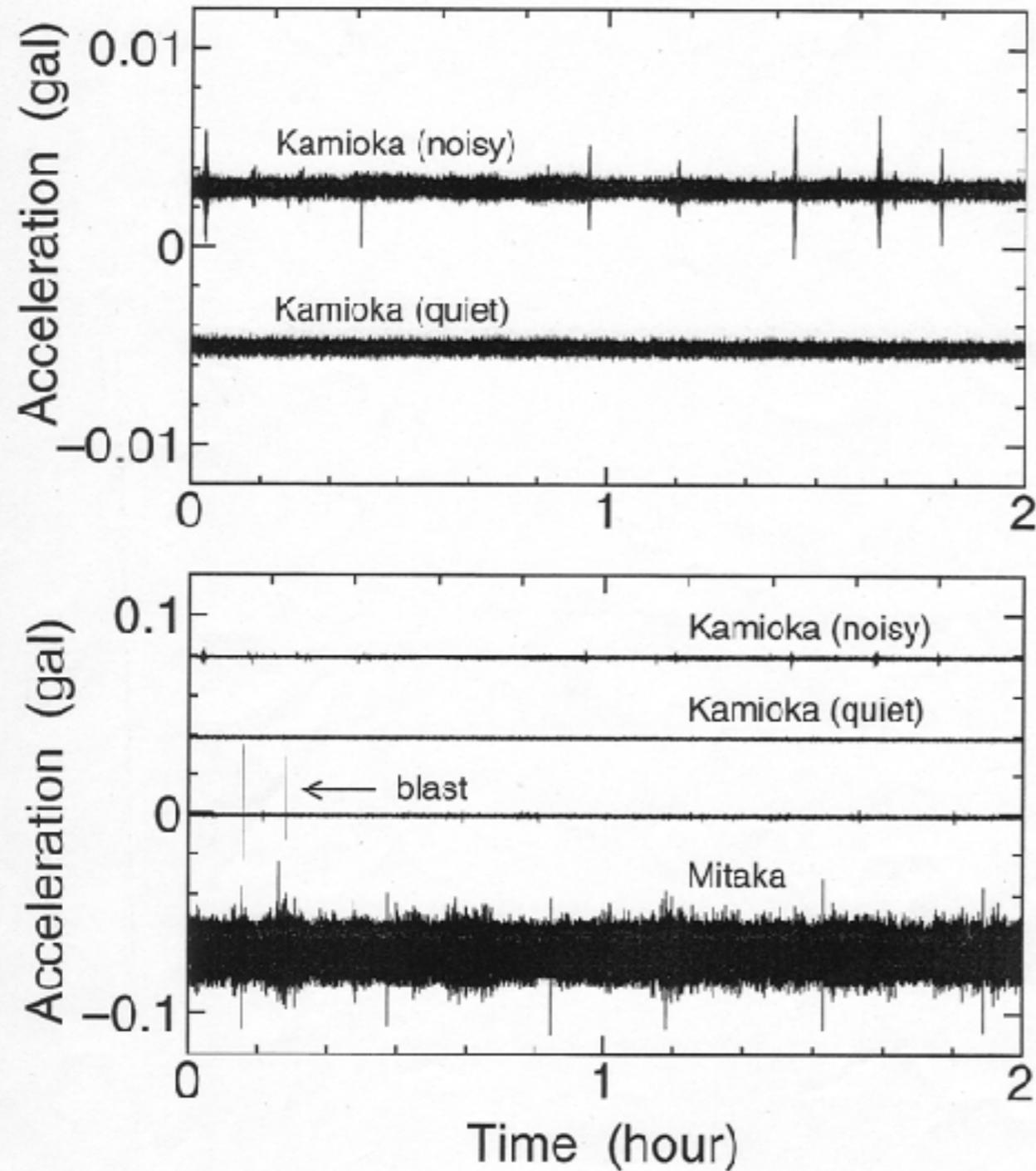
なぜ地下なののか？

安定、静謐な環境

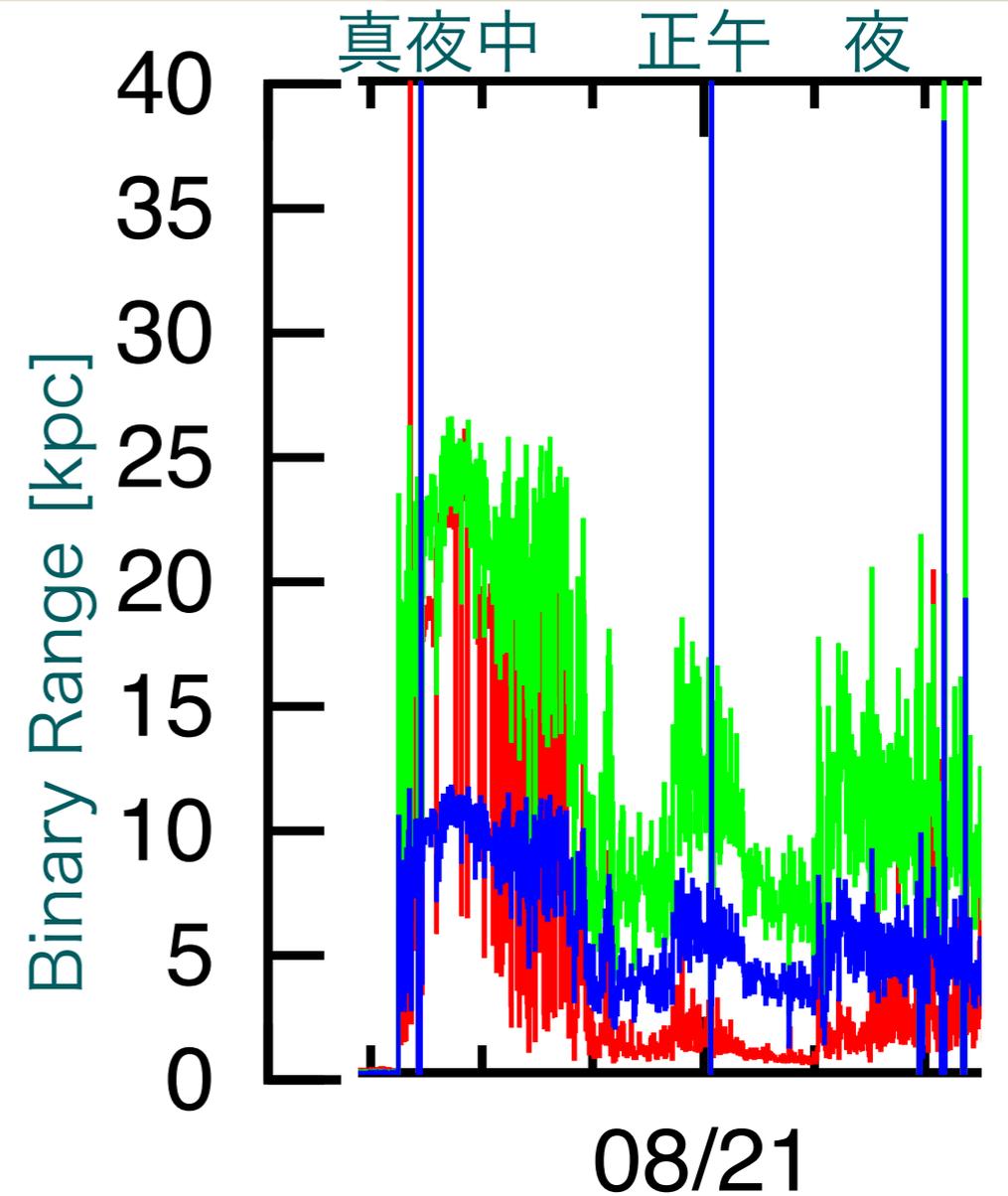
バックグラウンドの軽減

		素粒子実験	共通要素	重力波検出
外部環境	地上	宇宙線 放射性物質 民生装置の電磁波	温度変化 (大) 気圧変化 人工物、人の活動	地面振動 (大) : 天然、人工由来 重力勾配揺らぎ
	地下	宇宙線(少、高エネ μ) 放射性物質	温度変化 (小) 気圧変化 (?) 湿度 (大)	地面振動 (小) 重力勾配揺らぎ(小)
装置内部		装置・資料の含む放射性物質など	電気回路	熱雑音 レーザー量子雑音

地面振動と重力波検出器



神岡鉱山内と三鷹の地面振動比較



TAMA300, 2001/8/21の検出レンジ履歴。夜間や12:00-13:00の間は感度が良くなっている。

重力波検出の将来は地下にある!?!

2G ==> 3G

■ KAGRAは2.5G (第2.5世代検出器)

感度では2G。aLIGO, aVirgoと同世代
3Gに必要な要素が採用されている：

- 地下サイト
- 低温鏡 サファイヤ

■ 3G (第3世代検出器)

静謐で安定な地下サイト

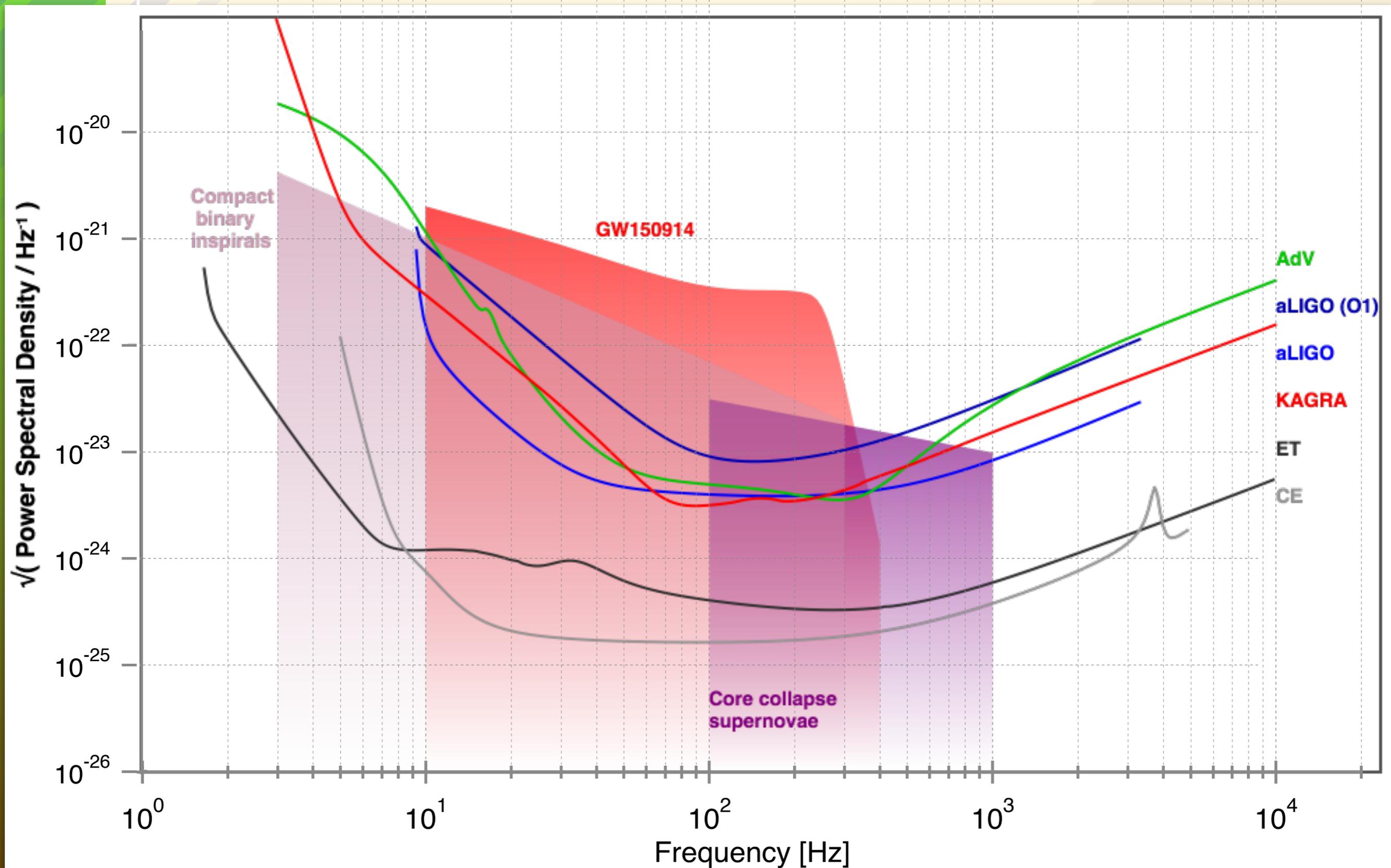
低温鏡 *ただし、基材、温度についてはいろいろ

長基線 10 ~ 40km

以上をもって、2Gより一桁感度を改善する。

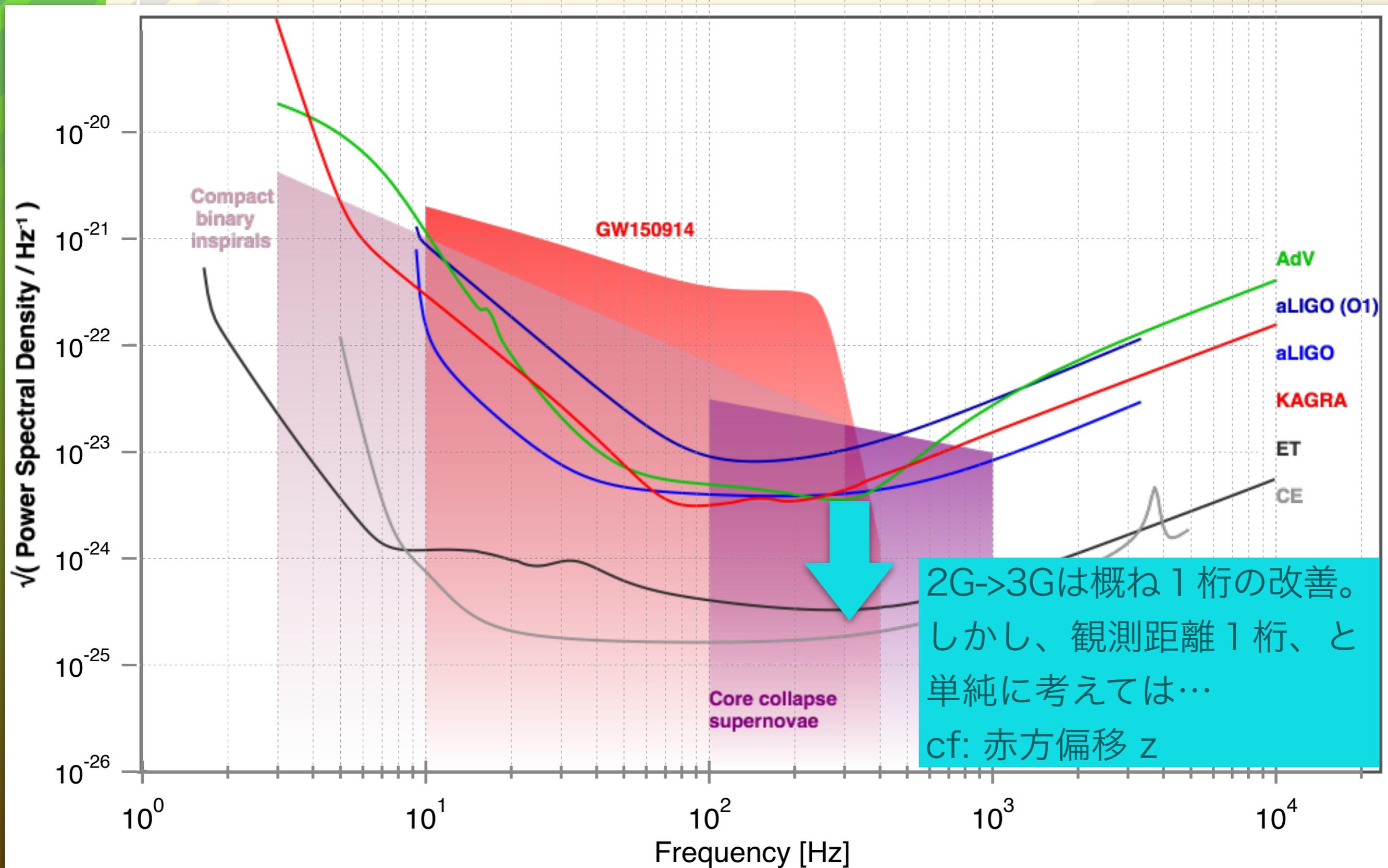
$z > 10$ の宇宙を見る。

第3世代(3G)検出器の感度



<http://rhcole.com/apps/GWplotter/>

第3世代(3G)検出器の感度



<http://rhcole.com/apps/GWplotter/>

Einstein Telescope



<http://www.et-gw.eu/index.php>

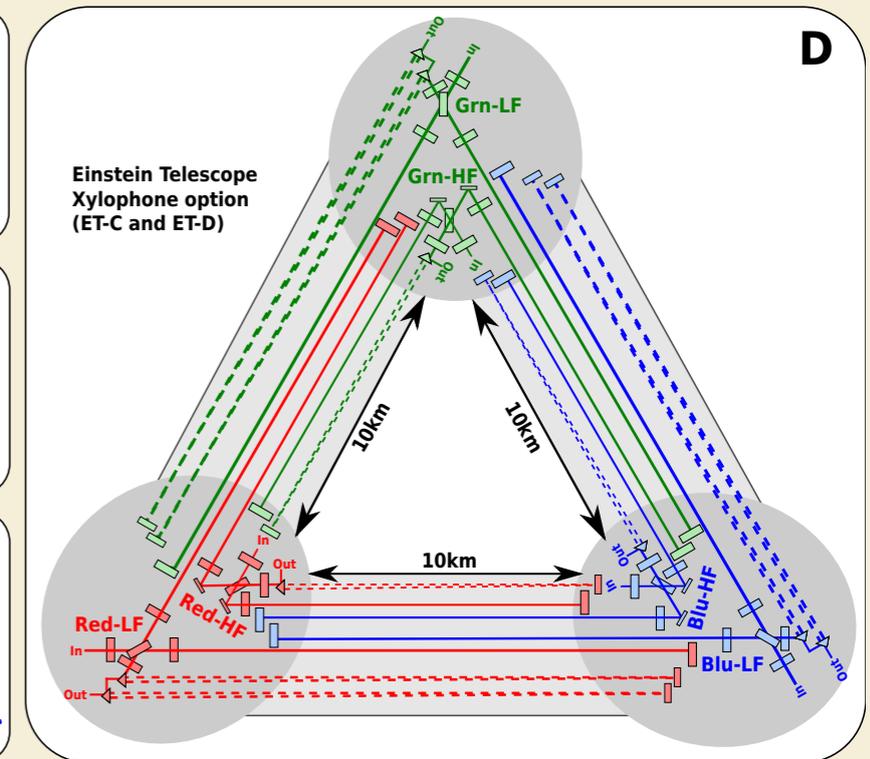
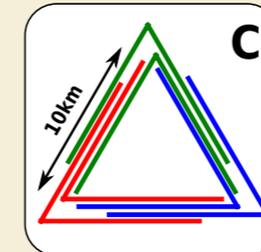
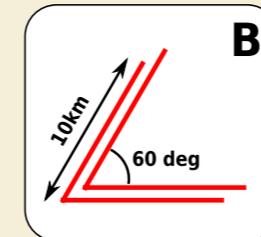
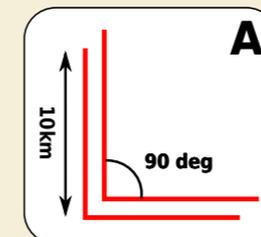
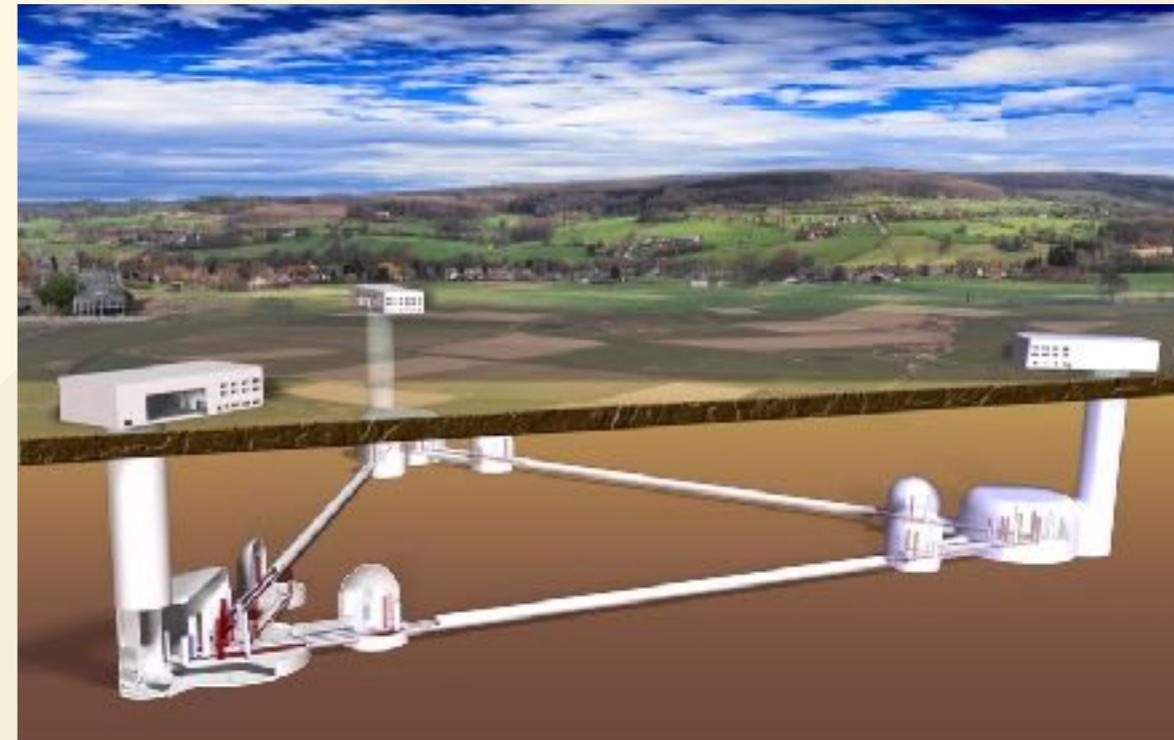
■ EGO (European Gravitational Observatory) の第 3 世代 検出器計画

■ 一辺 10km の三角形トンネル

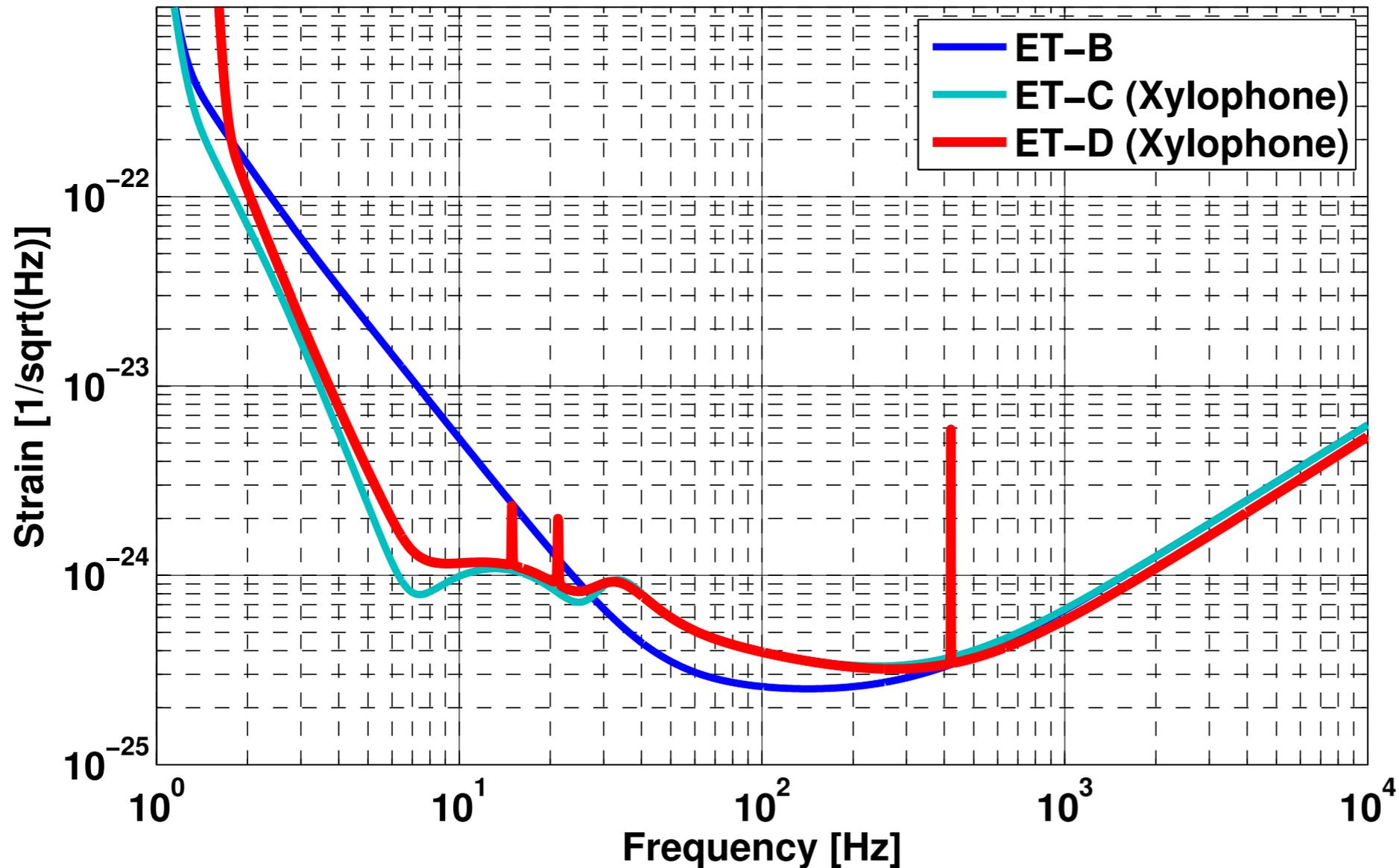
→ 基線長 10km の干渉計 3

台

■ 地下サイト



ET design



第3世代では、低周波領域を改善しないとだめ。
単純に、2Gを一桁改善では利益が薄い。
赤方偏移のため。

Figure 6. Historical evolution of strain sensitivity starting from a single cryogenic broadband detector (ET-B) to the xylophone design (ET-C) [13] to the

Parameter	ET-D-HF	ET-D-LF
Arm length	10 km	10 km
Input power (after IMC)	500 W	3 W
Arm power	3 MW	18 kW
Temperature	290 K	10 K
Mirror material	Fused silica	Silicon
Mirror diameter / thickness	62 cm / 30 cm	min 45 cm / TBD
Mirror masses	200 kg	211 kg
Laser wavelength	1064 nm	1550 nm
SR-phase	tuned (0.0)	detuned (0.6)
SR transmittance	10 %	20 %
Quantum noise suppression	freq. dep. squeez.	freq. dep. squeez.

Cosmic Explorer

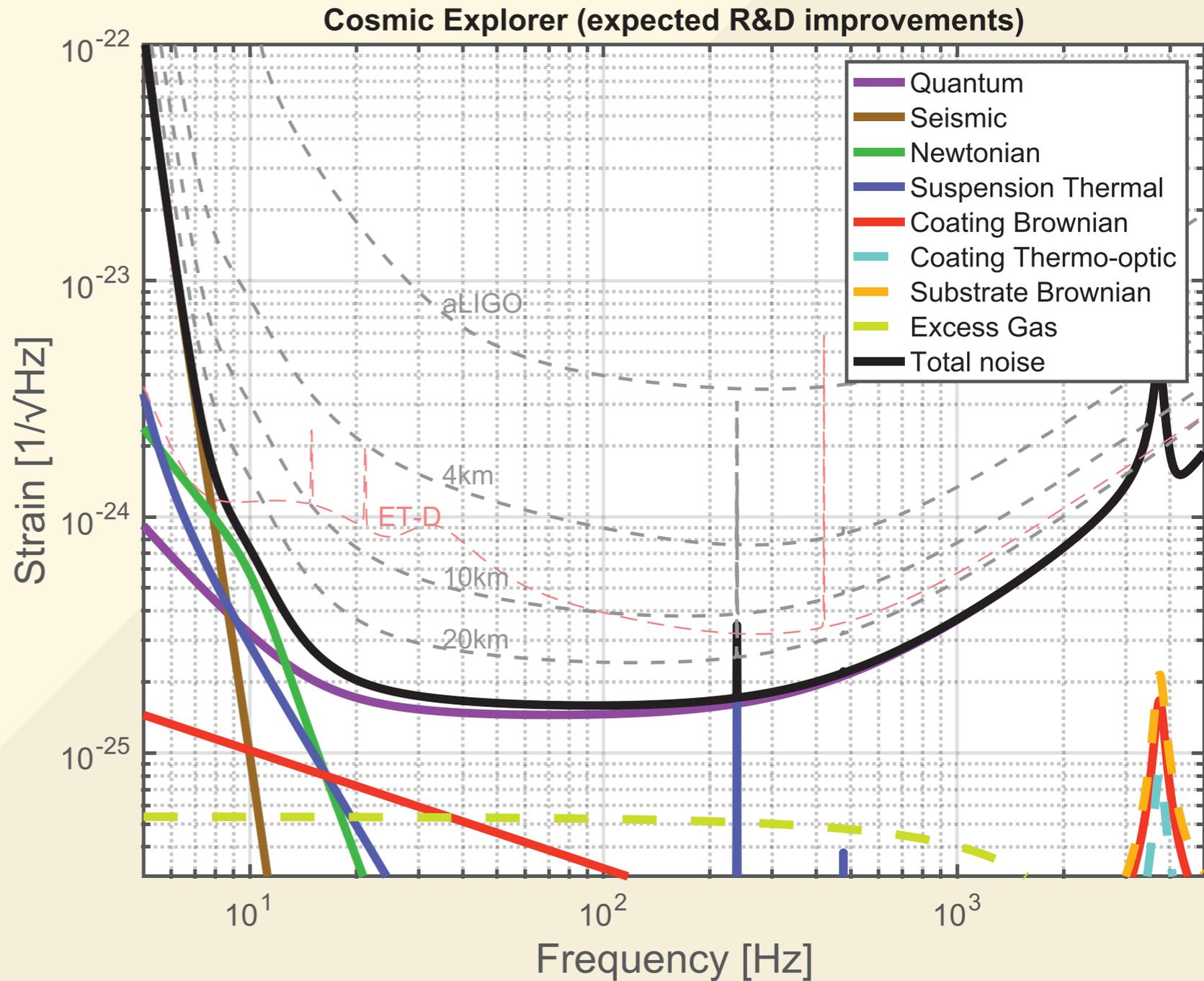
米国の将来計画

CEより前に、
advanced
LIGOのさらに
アップグレード
であるLIGO+、
Voyagerも計
画されている。

地下

基線長 40km

トンネル？溝？ どちらにしる、両端と中央の高低差、両
端の鉛直方向が平行でない。



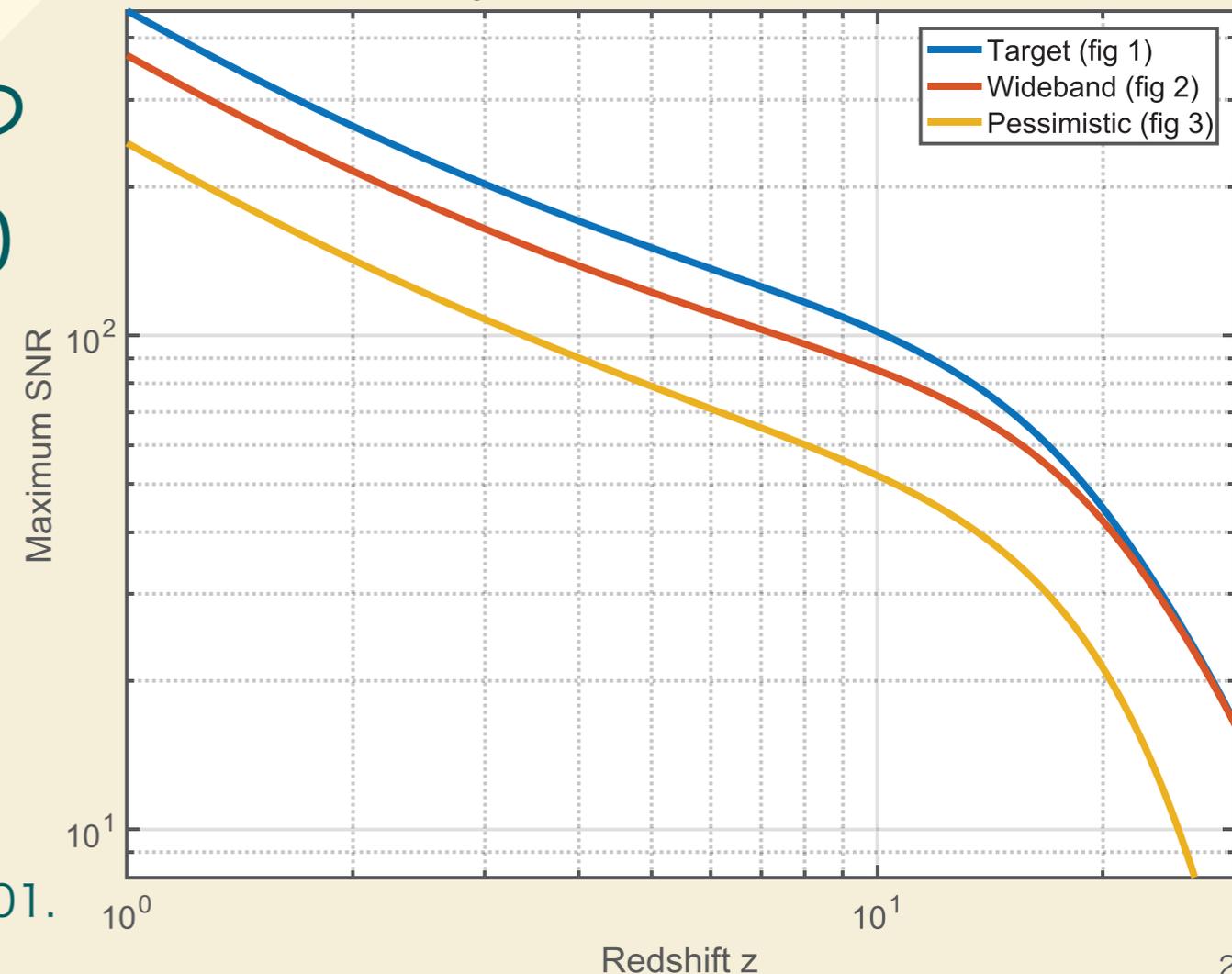
Class._Quantum_Grav._34_044001.

CE design

	CE	CE pess	ET-D (HF)	ET-D (LF)
L_{arm}	40 km	40 km	10 km	10 km
P_{arm}	2 MW	1.4 MW	3 MW	18kW
λ	1550 nm	1064 nm	1064 nm	1550 nm
r_{sqz}	3	3	3	3
m_{TM}	320 kg	320 kg	200 kg	200kg
r_{beam}	14 cm	12 cm	9 cm	7 cm (LG ₃₃)
T	123 K	290 K	290 K	10K
ϕ_{eff}	5×10^{-5}	1.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}	1.3×10^{-4}

30-30 MsolarのBBHについて、 $z < 2$ なら $S/N > 100$ (pessimisticなデザイン)

Binary Black Hole SNR vs. Redshift



宇宙の時代をどこまで遡れるか？

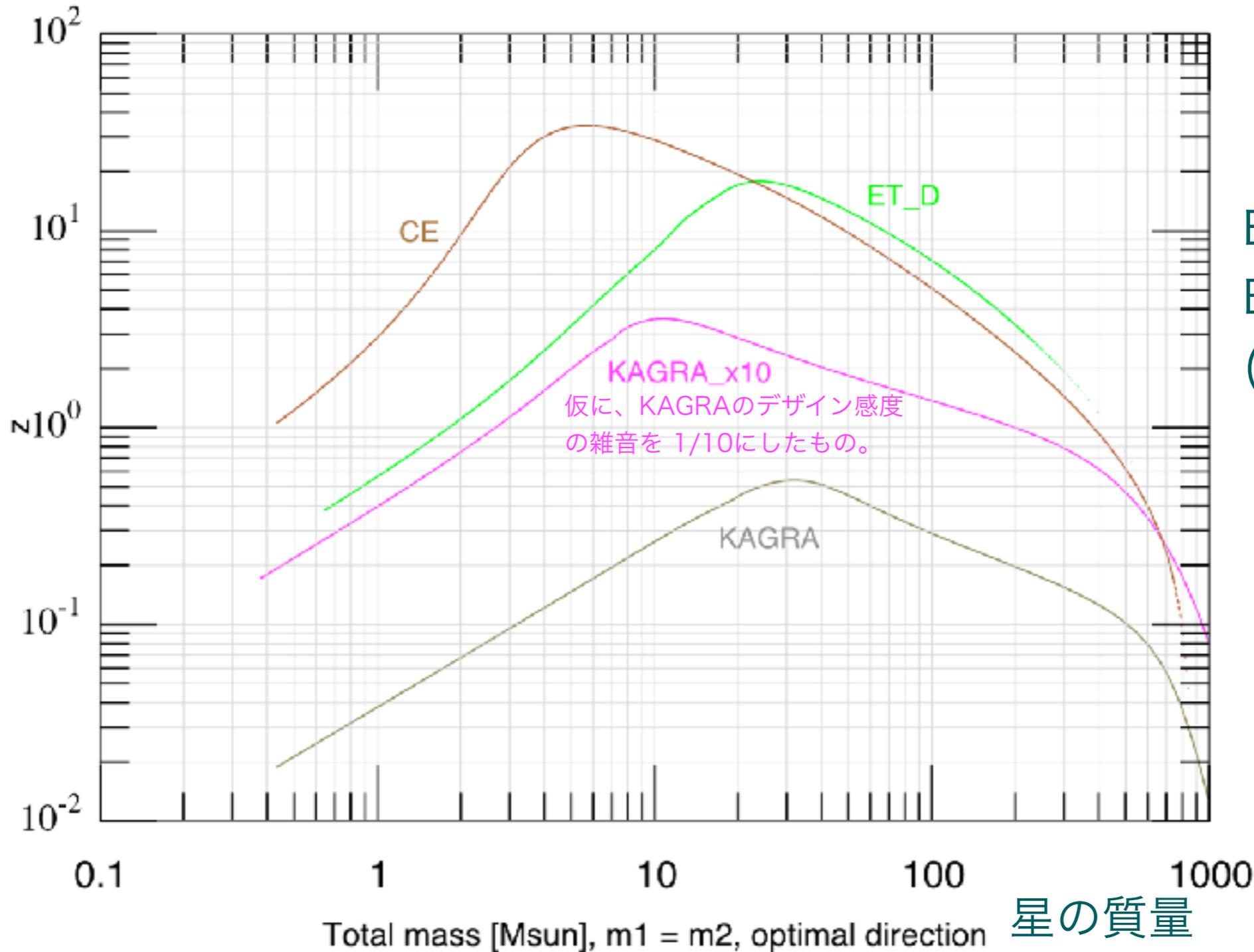
■ $z > 10$ まで検出できるならかなり有望

ET, CE の性能はそれを可能にする。

重力波信号

$$S/N \propto (1+z)^{-1/6}$$

検出可能距離



ET : 20Msun
BBH の検出レンジ
(S/N>8)でz~17

by 宮本(阪市大理)
15日 U31会場

これからの重力波観測による研究

■ 基礎物理

相対性理論の検証

ブラックホールの物理

■ 天体物理・宇宙物理

大質量BHおよびBBHの起源

中性子星の物理

超新星爆発の物理

■ マルチメッセンジャーの一翼としての役割

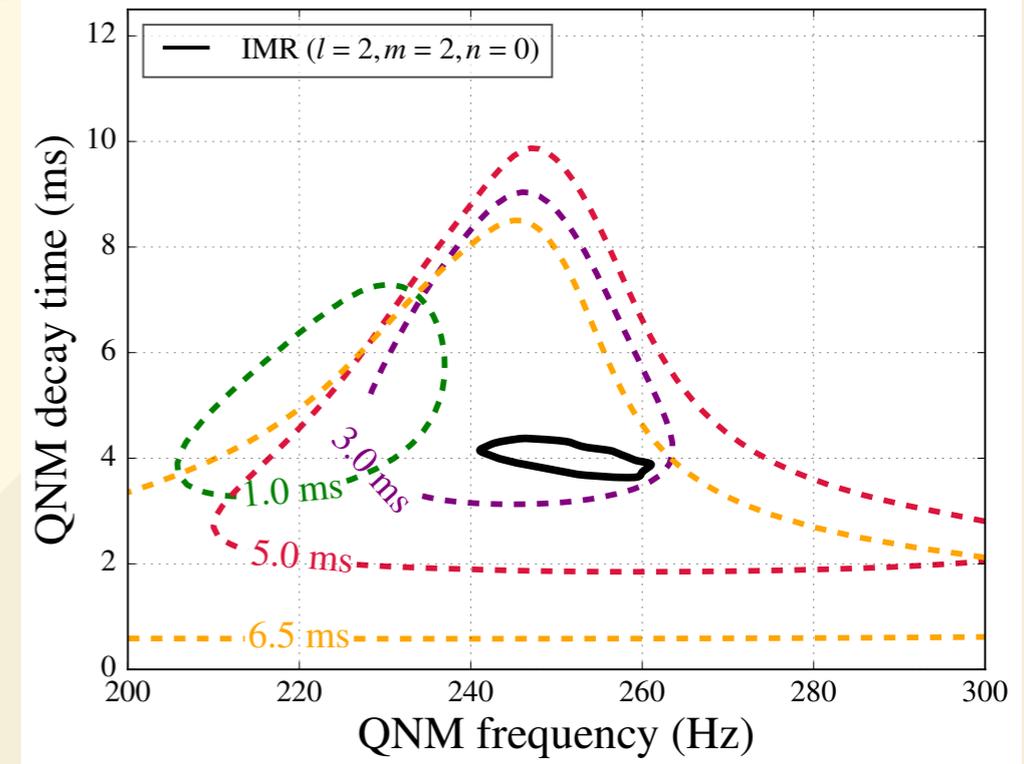
相対論の検証 (例)

GW150914 BH準固有振動解析

(この解析ではKerr BHのパラメータを求めているが、Schwarzschild BHと有為な差が見つからない。)

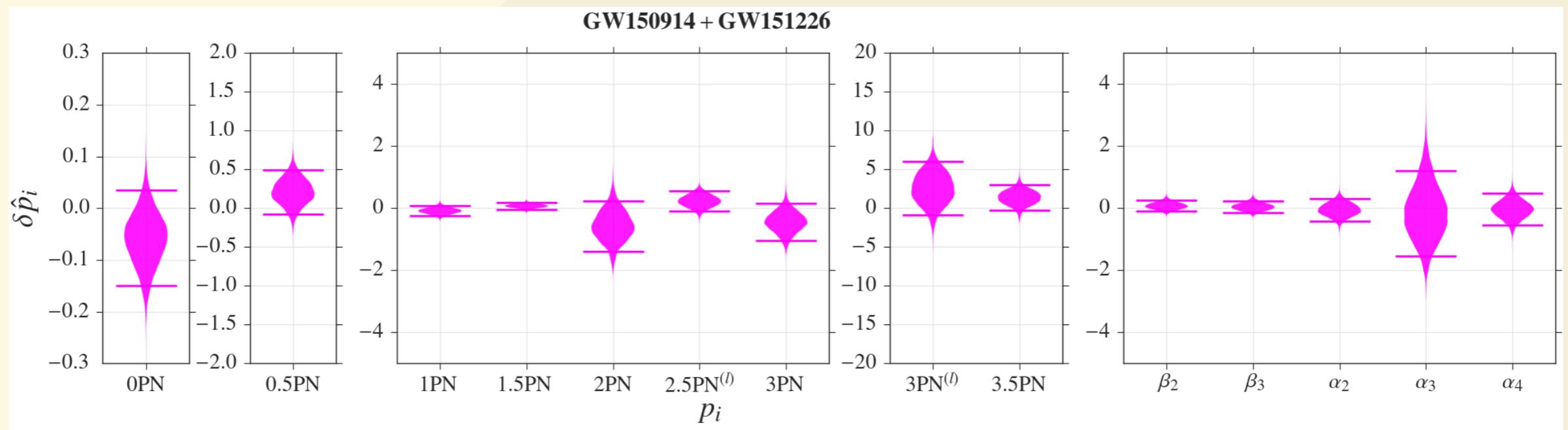
Phys. Rev. Lett. 116, 221101

→ もっと大きなS/Nのイベントが望まれる。
 =地球の近傍で起きるか、検出器の感度を良くするか。



形成されたBHの準固有振動を仮定しての解析。
 1,3,5,6.5ms は、連星合体を基準にBH準固有振動開始を仮定する時刻。

GW150914 + GW151226でのポスト=ニュートン波形パラメータの検証



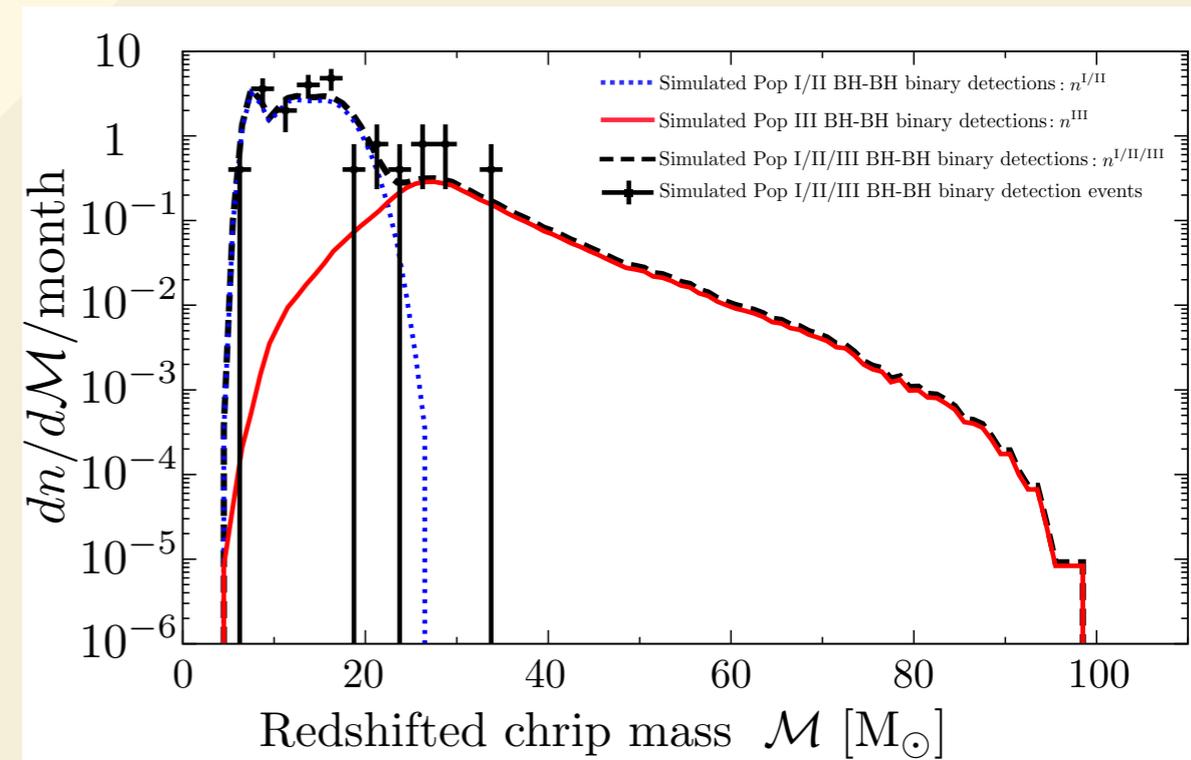
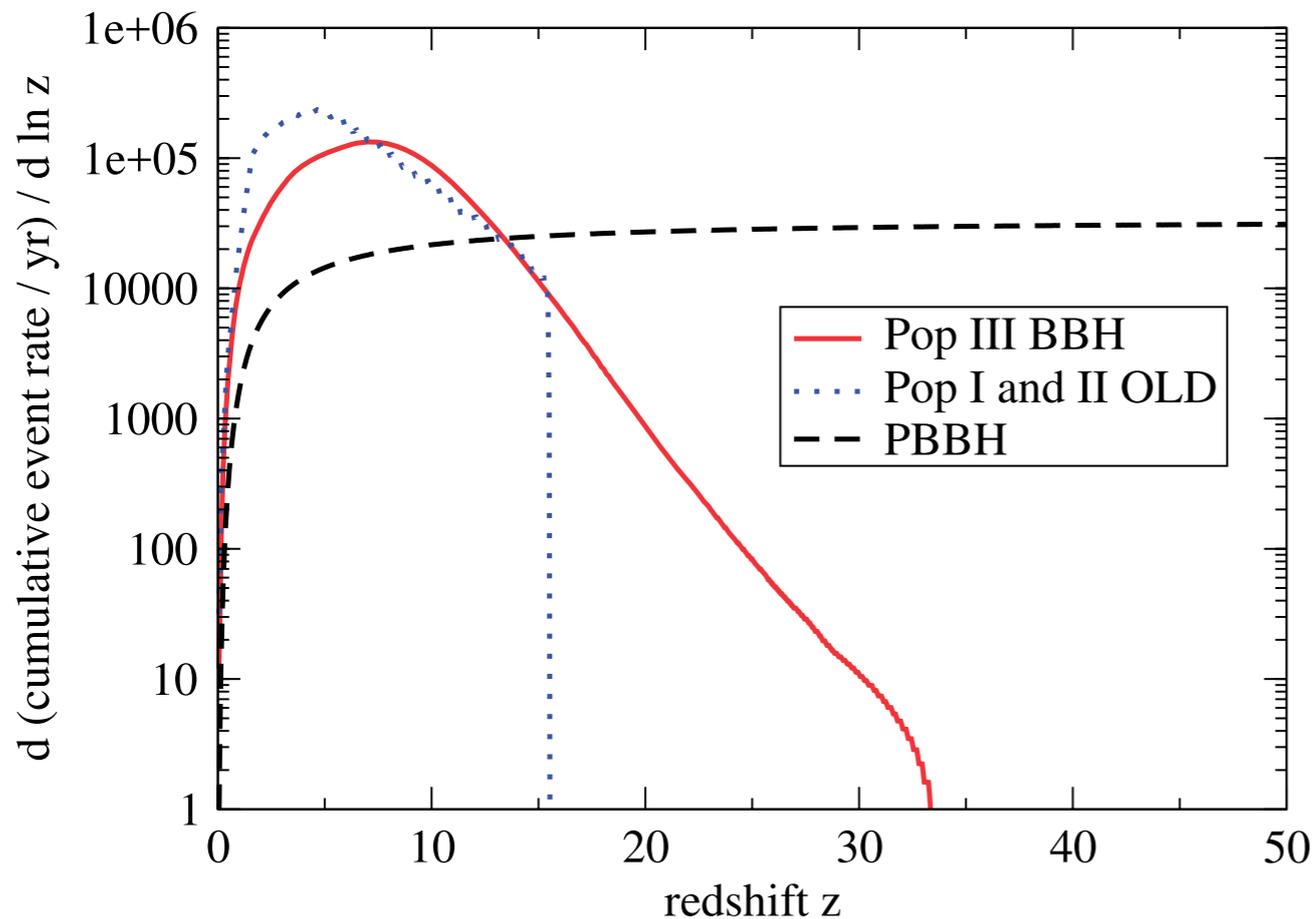
重力波はBBHの起源に迫れるか？

可能性：

Pop III, Dynamical formation, Primordial BH, それ以外？

z の大きなイベントの観測が決め手

数が必要



KAGRAやLIGOの最終感度では、BBH質量分布からPopIII起源を肯定できるかもしれない。

A.Miyamoto et.al., PRD in press

PTEP 2016, 093E01

そのほかの重力波の観測は？

にわかにコメントすることは難しいが、十分期待が持てる波源はある。

中性子星連星(NS-NS)の合体

発見は時間（感度達成）の問題だろう。

中性子星ーブラックホール連星(NS-BH)?

あるかどうかわからない。形成しにくいのではないかという研究もある。

NS-NS,NS-BHはEM追観測が期待できるから、発見されれば大いにブレイクスルーをもたらすだろう。

超新星爆発

運を天に任せて…

超新星爆発も、micro physics と相対論を取り入れた数値シミュレーション研究が進んでいる。1イベントでも受ければ相当なインパクトがある。

重力波ーニュートリノの同時観測も期待できる。

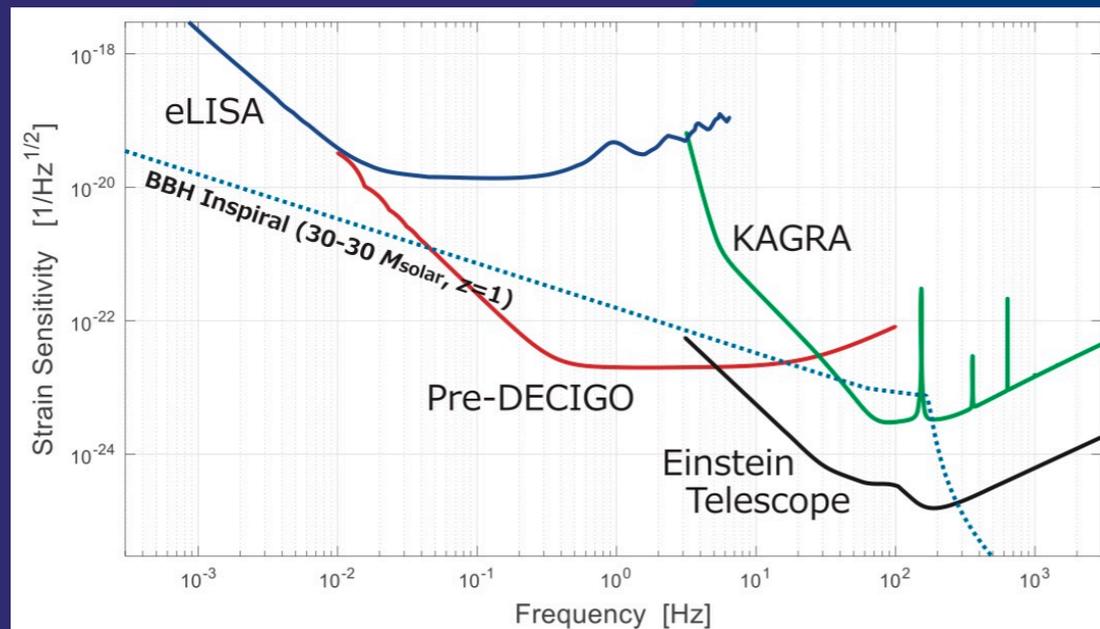
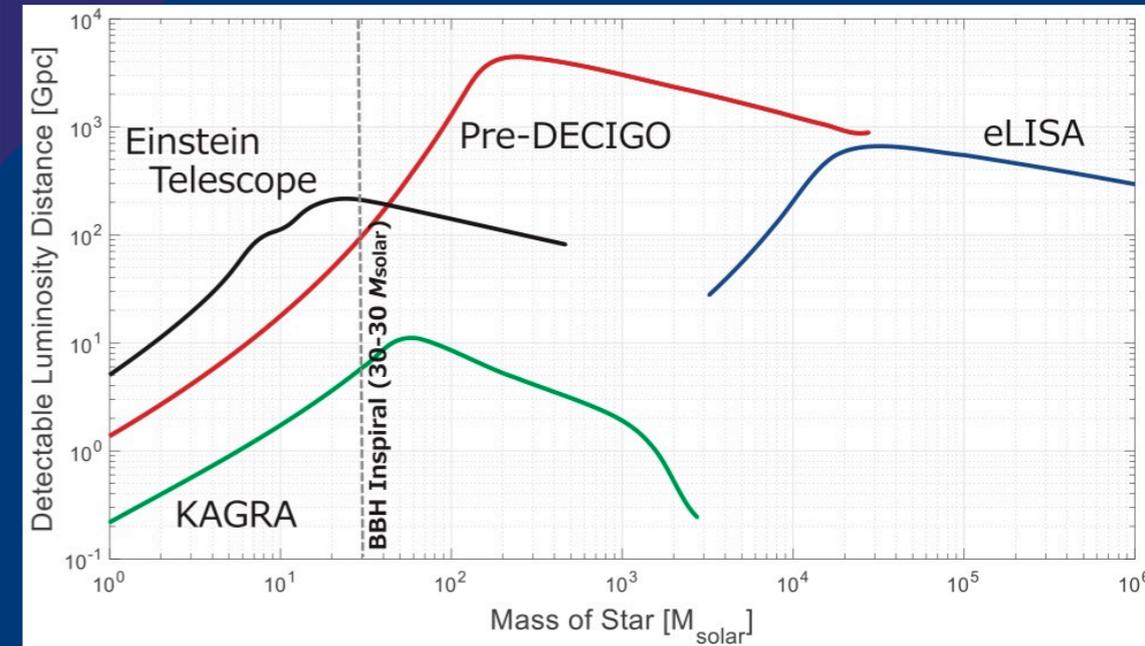
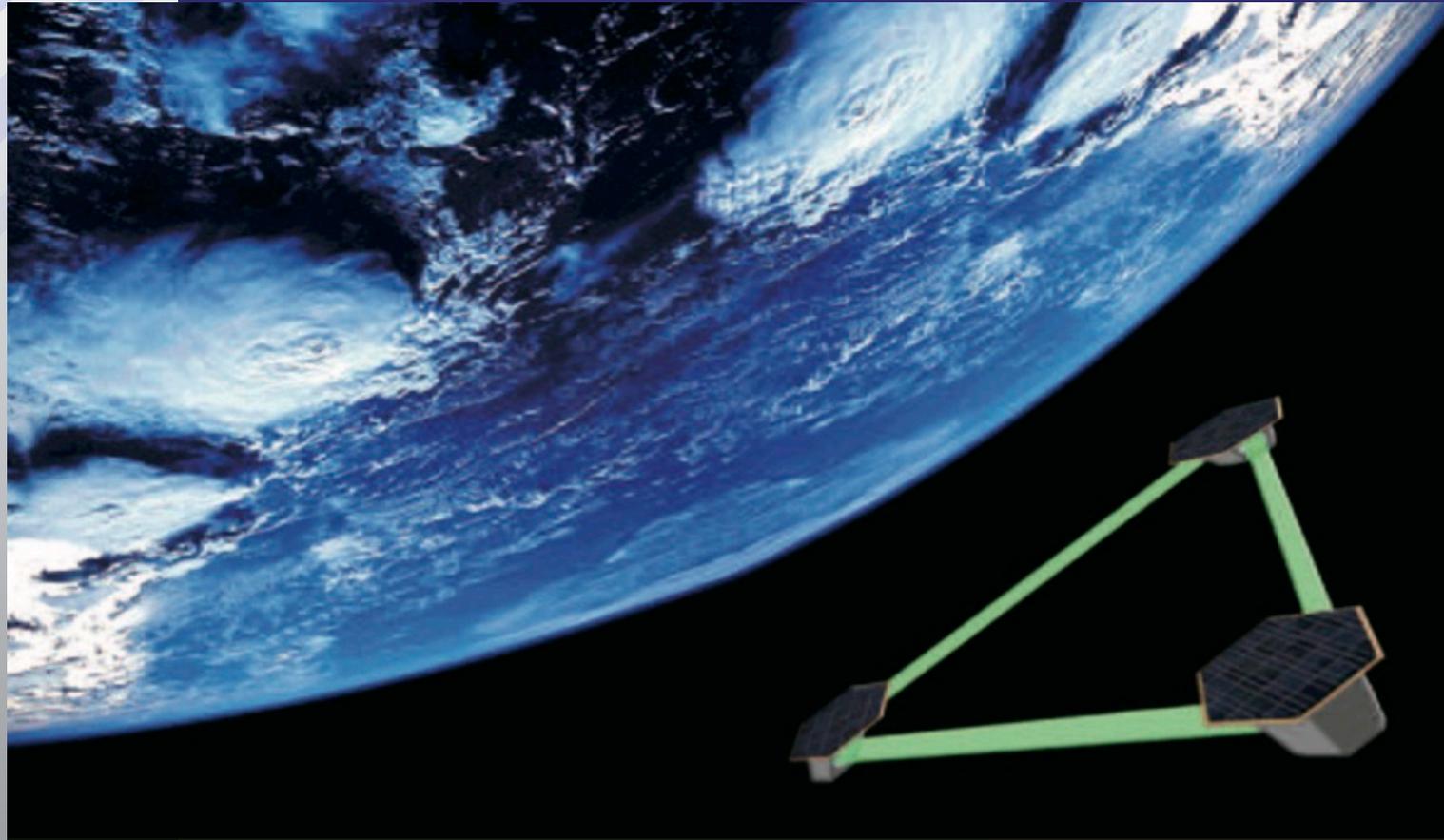
連続波（パルサー、LMXB）

背景重力波

Epoch			2015–2016	2016–2017	2018–2019	2020+	2024+
Planned run duration			4 months	9 months	12 months	(per year)	(per year)
Expected burst range/Mpc	LIGO		40–60	60–75	75–90	105	105
	Virgo		—	20–40	40–50	40–70	80
	KAGRA		—	—	—	—	100
Expected BNS range/Mpc	LIGO		40–80	80–120	120–170	190	190
	Virgo		—	20–65	65–85	65–115	125
	KAGRA		—	—	—	—	140
Achieved BNS range/Mpc	LIGO		60–80	60–100	—	—	—
	Virgo		—	25–30	—	—	—
	KAGRA		—	—	—	—	—
Estimated BNS detections			0.002–2	0.007–30	0.04–100	0.1–200	0.4–400
Actual BNS detections			0	—	—	—	—
90% CR	% within	5 deg ²	< 1	1–5	1–4	3–7	23–30
		20 deg ²	< 1	7–14	12–21	14–22	65–73
		median/deg ²	460–530	230–320	120–180	110–180	9–12
Searched area	% within	5 deg ²	4–6	15–21	20–26	23–29	62–67
		20 deg ²	14–17	33–41	42–50	44–52	87–90

もう一つの解：宇宙へ

DECIGOの可能性



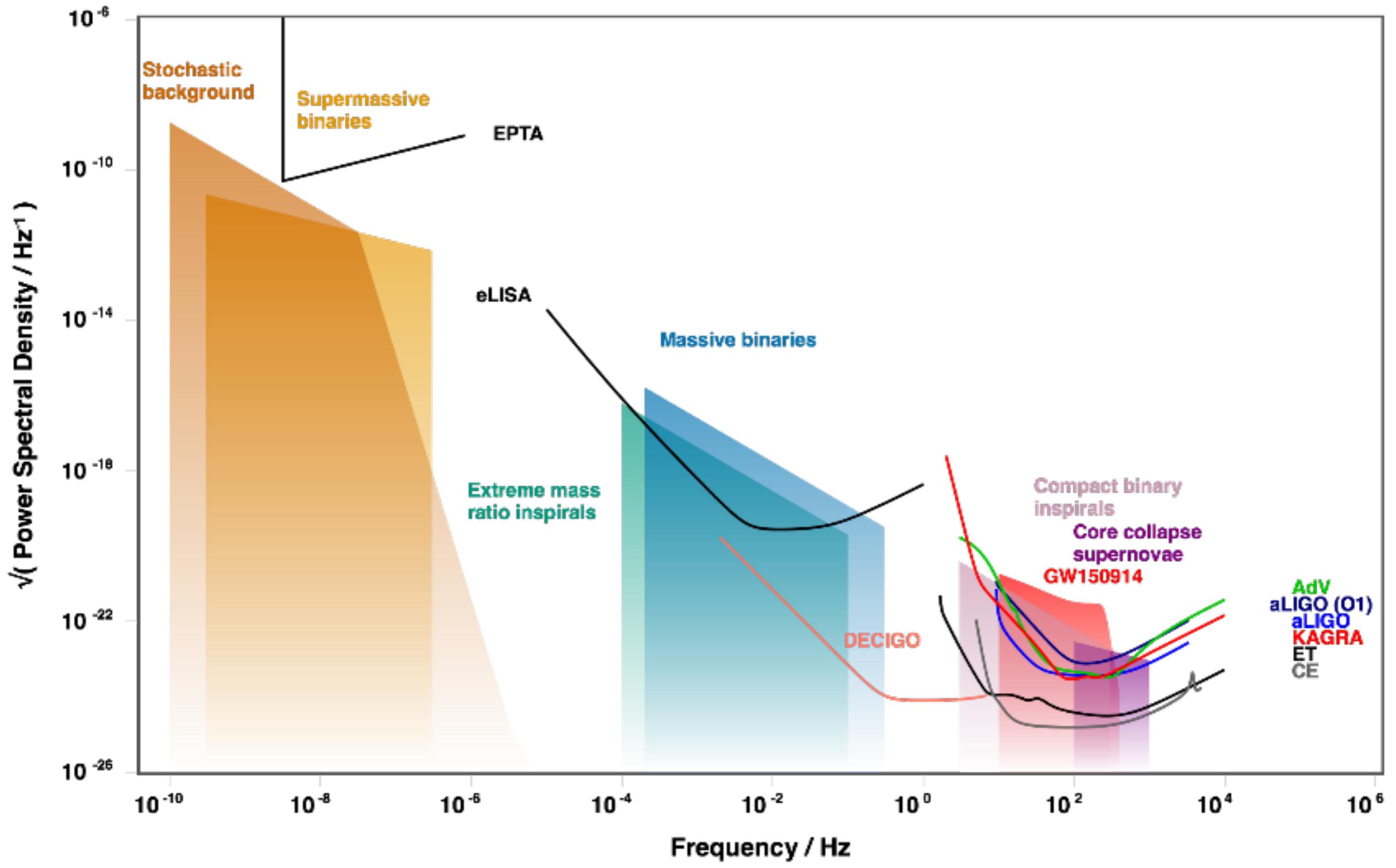
PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 093E01 (16 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptw127

Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes

Takashi Nakamura¹, Masaki Ando^{2,3,4}, Tomoya Kinugawa⁵, Hiroyuki Nakano^{1,*}, Kazunari Eda^{2,4}, Shuichi Sato⁶, Mitsuru Musha⁷, Tomotada Akutsu³, Takahiro Tanaka^{1,8}, Naoki Seto¹, Nobuyuki Kanda⁹ and Yousuke Itoh⁴

(まとめに代えて)多波長の重力波

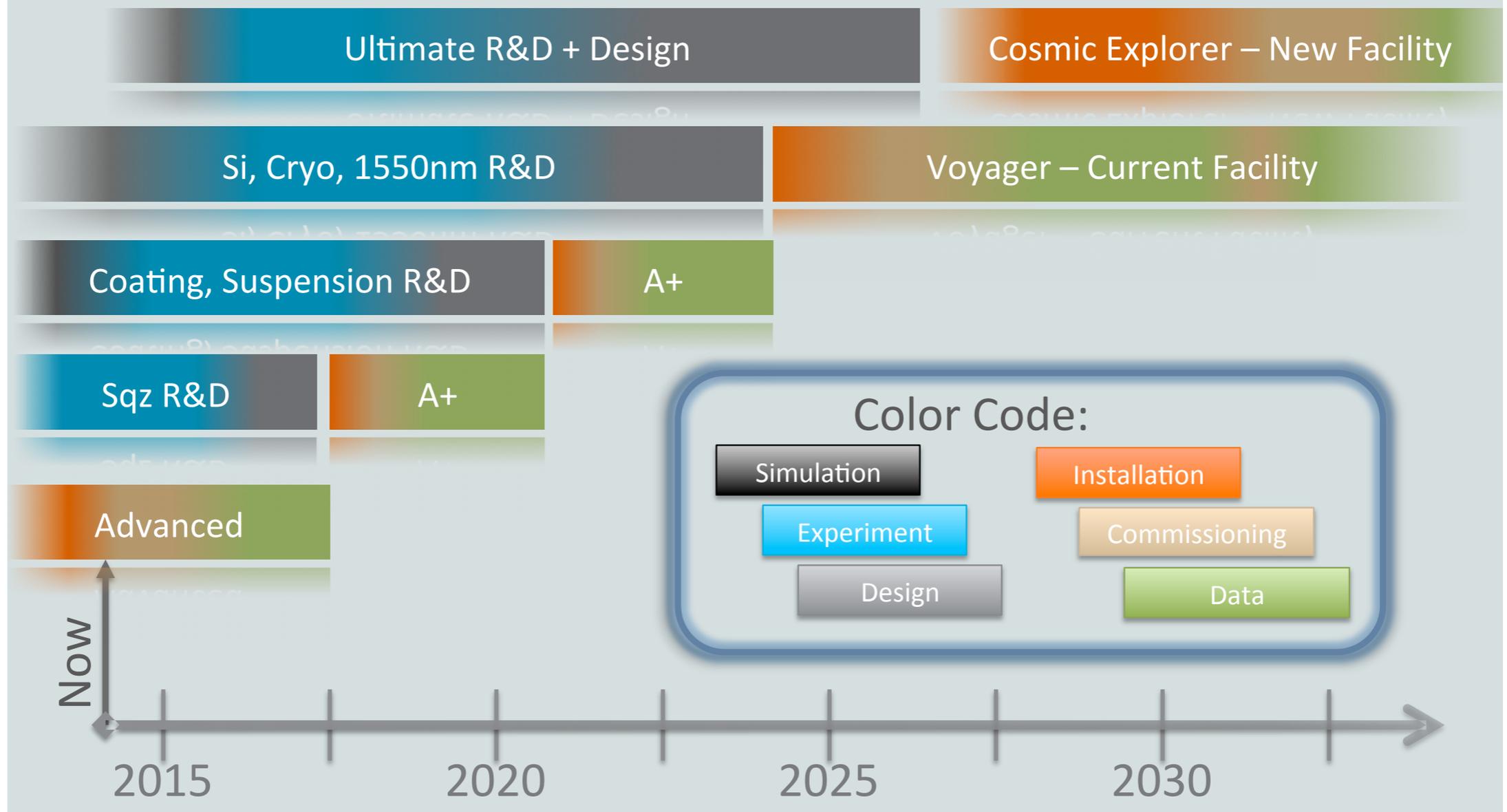


<http://rhcole.com/apps/GWplotter/>

予備

LIGO's Future Plan

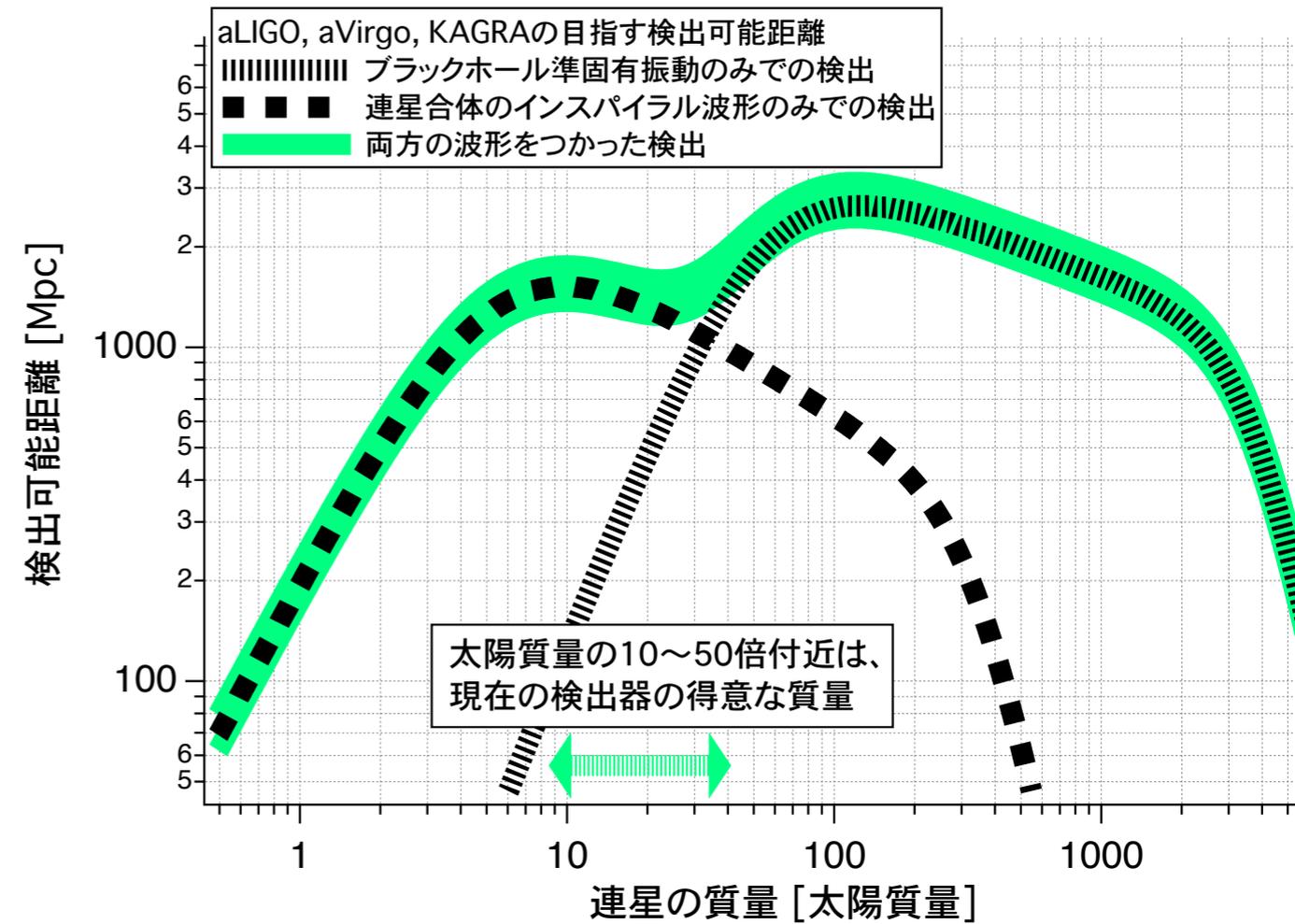
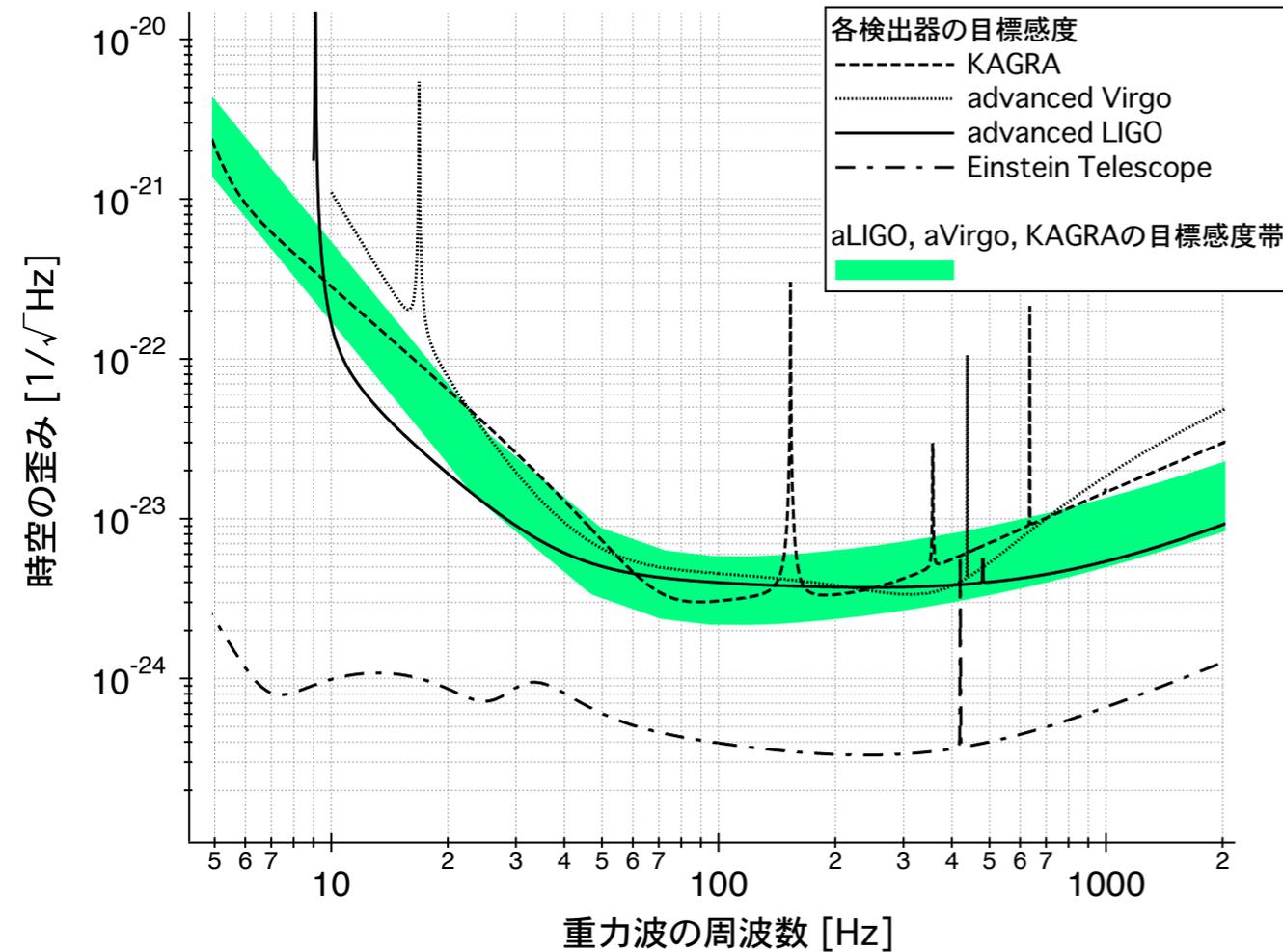
LIGO Upgrade Timeline



LIGO Document T1600119-v4

The LSC-Virgo White Paper on Instrument Science (2016-2017 edition)

Detector Sensitivity VS Range





30 + 30 solar mass BHs

Interesting target for three reasons:

Nakano Talk

Inspiral and ringdown phases have roughly equal SNRs, so provides good test of GR

If population III stars (formed at redshifts 5-10) exist, these might be a substantial fraction.

Perhaps we will detect several of them in the first aLIGO data run O1, this September!

