

# 重力波観測の 今・未来

国立天文台・東大天文・総研大天文

都丸 隆行

日本加速器学会, 2022年10月18日

14 Sep. 2015



# これまでに観測された重力波イベント

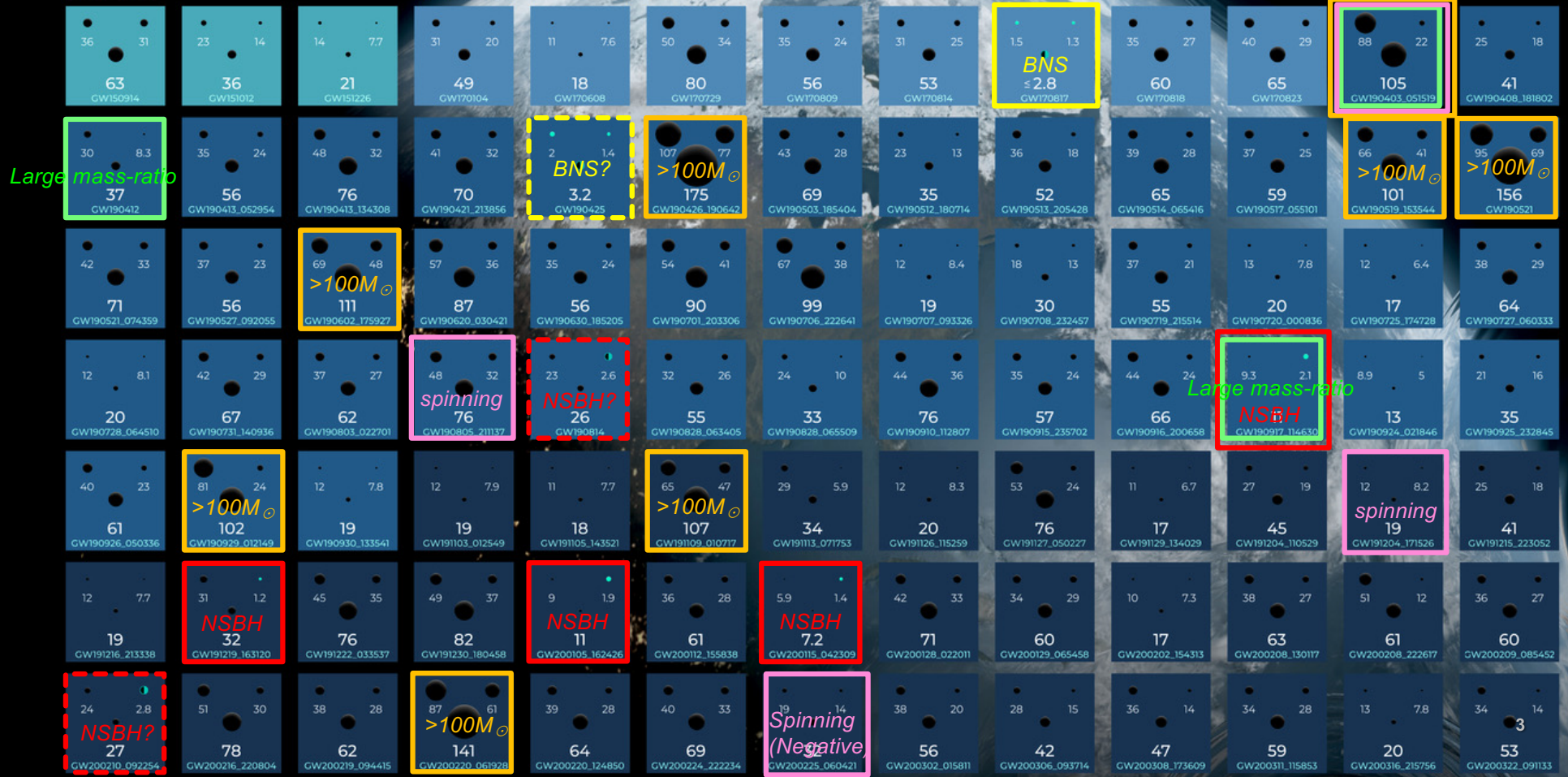
合計90個

Large mass-ratio  
spinning  
>100M<sub>☉</sub>

OBSERVING  
01  
RUN  
2015 - 2016

02  
2016 - 2017

03a+b  
2019 - 2020



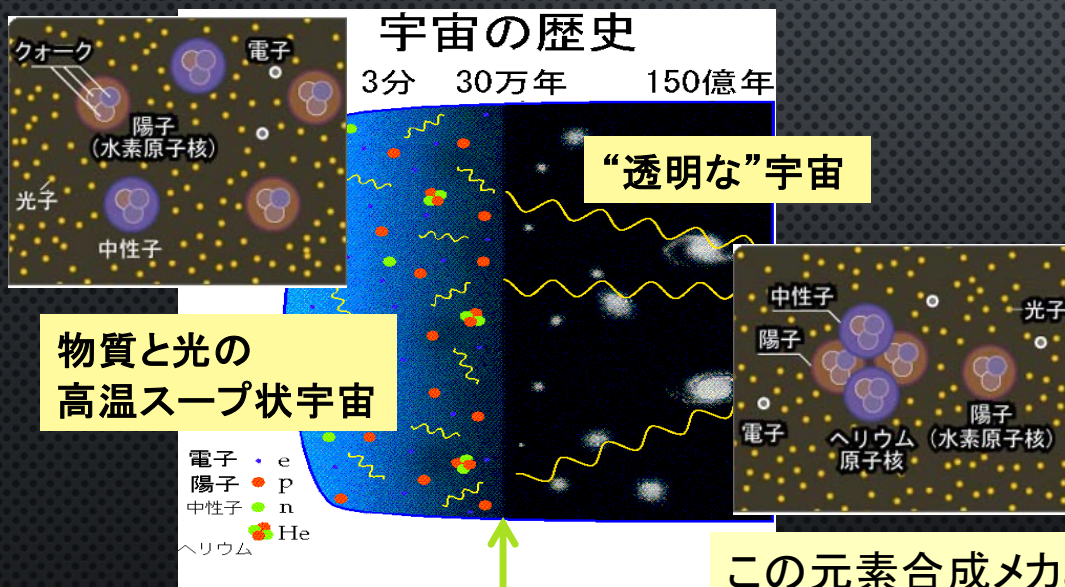
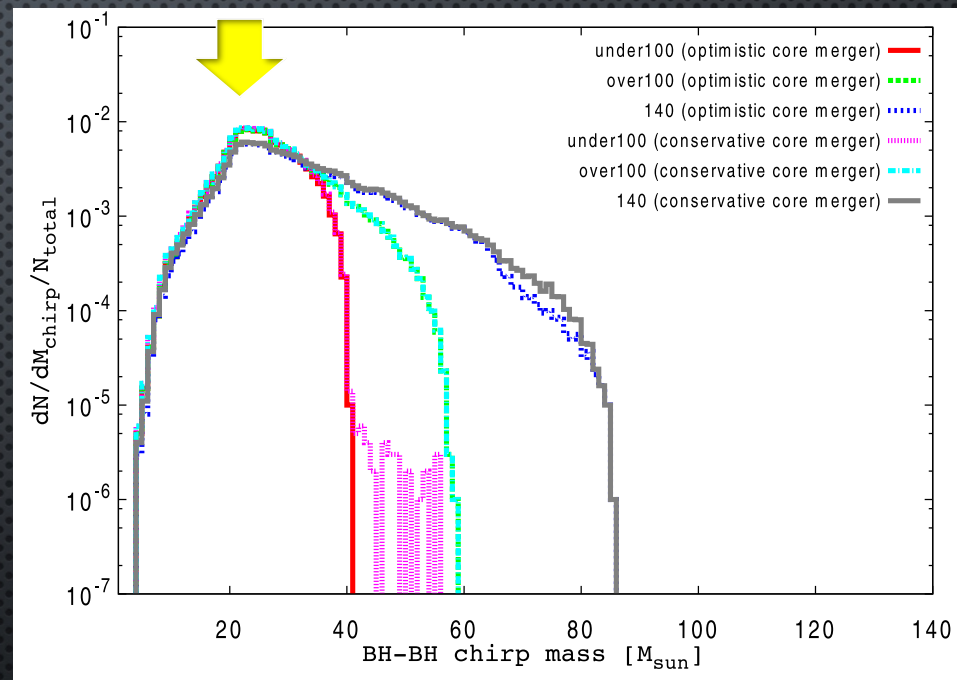
# ① 種族 III (POP III) の星

軽い元素しか含まない星。第一世代の星の候補。

## ビッグバン宇宙論(ガモフ)

宇宙に存在する物質の73 wt%は水素、24 wt%はヘリウム、これより重い元素はわずか3 wt%しかないことを説明するため、宇宙は最初火の玉で、元素合成が起こったとする。

25-30  $M_{\odot}$  Kinugawa et al., arXiv:1505.06962v2

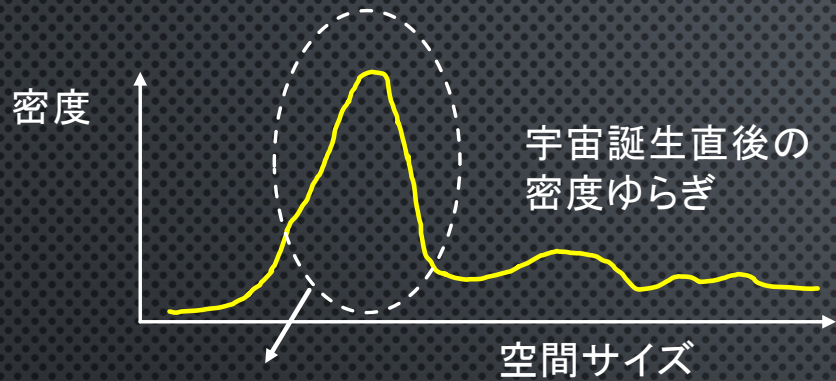


宇宙の晴れ上がり

この元素合成メカニズムではリチウムよりも重い元素ができない。

- 初期の星は軽元素のみでできているはず。(種族 III)
- 種族 IIIの星がたくさんあると、数10太陽質量のBHがたくさんできる。

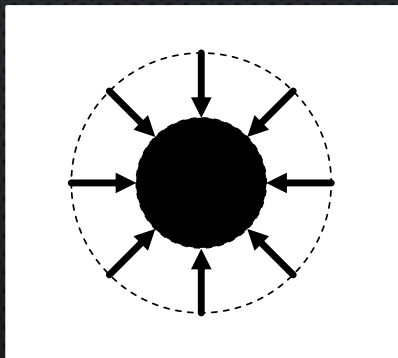
## ② 原始ブラックホール



大きな密度ゆらぎ

重力崩壊

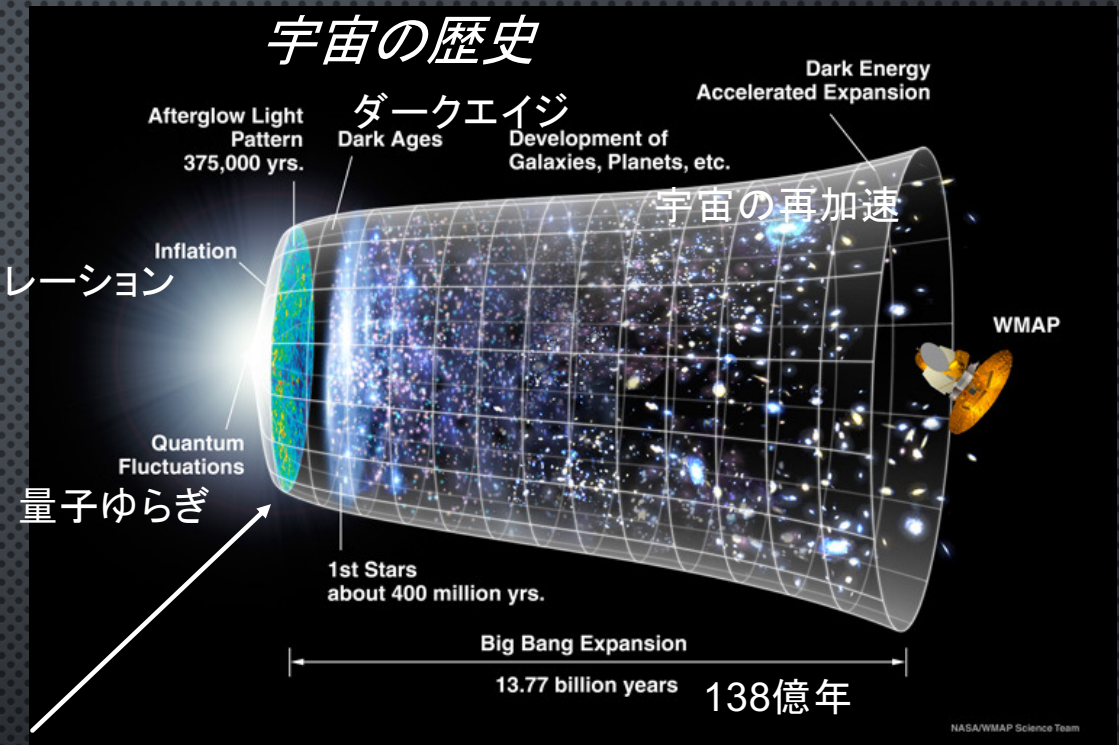
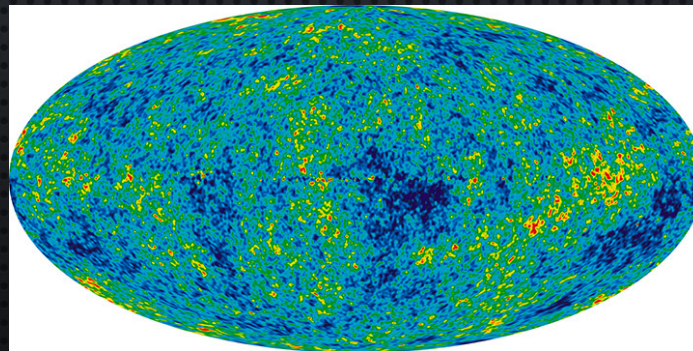
証拠



原始ブラックホール

スケールが違う

宇宙マイクロ波背景放射

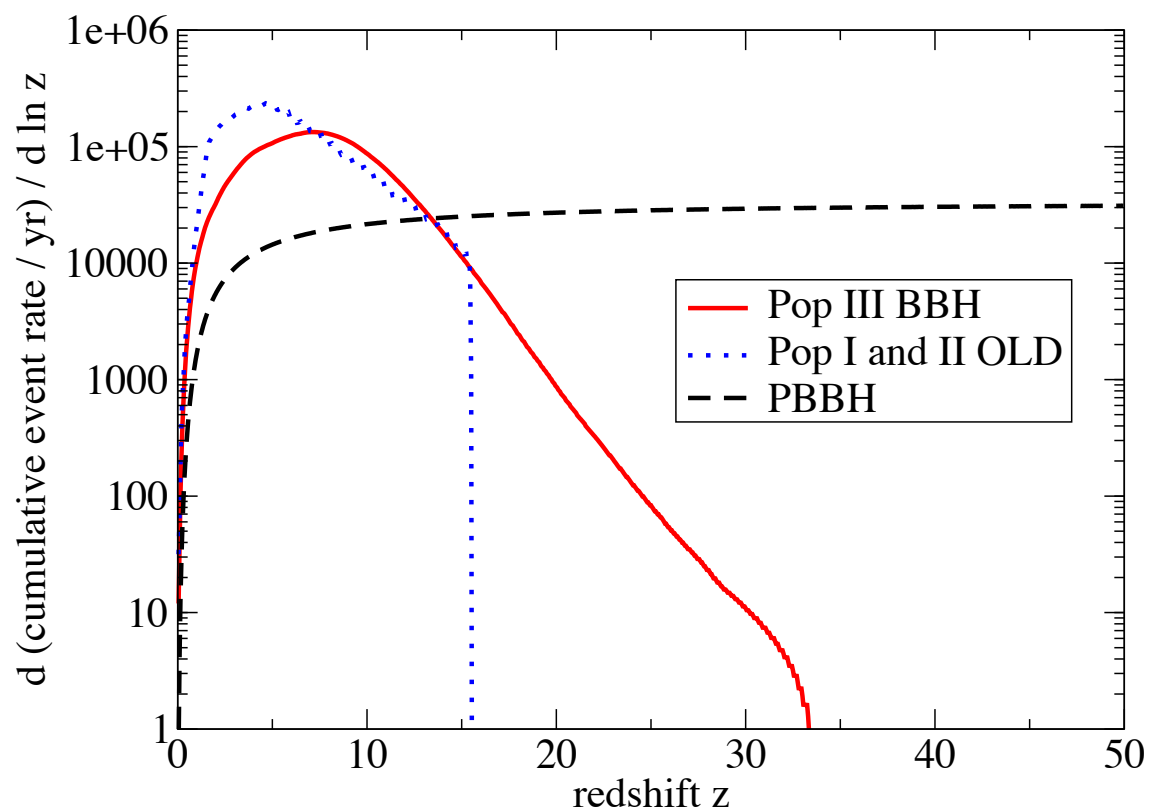


いつ重力崩壊したかにより、  
1/10万g ~ 数100太陽質量まで、  
様々な質量のBHが誕生しうる。

30太陽質量だと、宇宙誕生後  
1/1000秒後くらいに形成。

宇宙誕生の謎に迫れるか？

# ブラックホール生成のシナリオ決定



$z > 10$  (宇宙誕生から約5億年)

より遠くのイベント探査が重要

天文学

→ 宇宙物理

T. Nakamura, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2015,  
[arXiv:1607.00897v2](https://arxiv.org/abs/1607.00897v2) [[astro-ph.HE](#)]

18 Aug. 2017

**SWIFT NEUTRON STAR  
COLLISION V. 2**



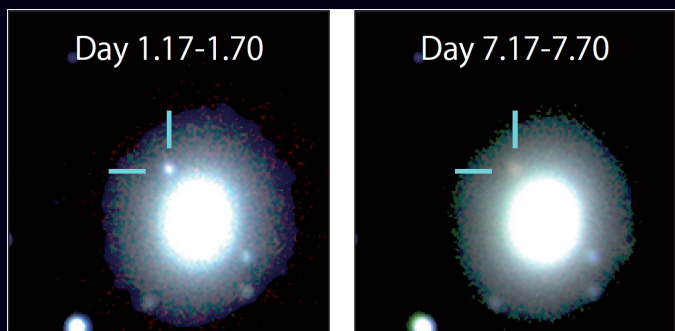
**ANIMATION: DANA BERRY  
310-441-1735**

**PRODUCED BY ERICA DREZEK**

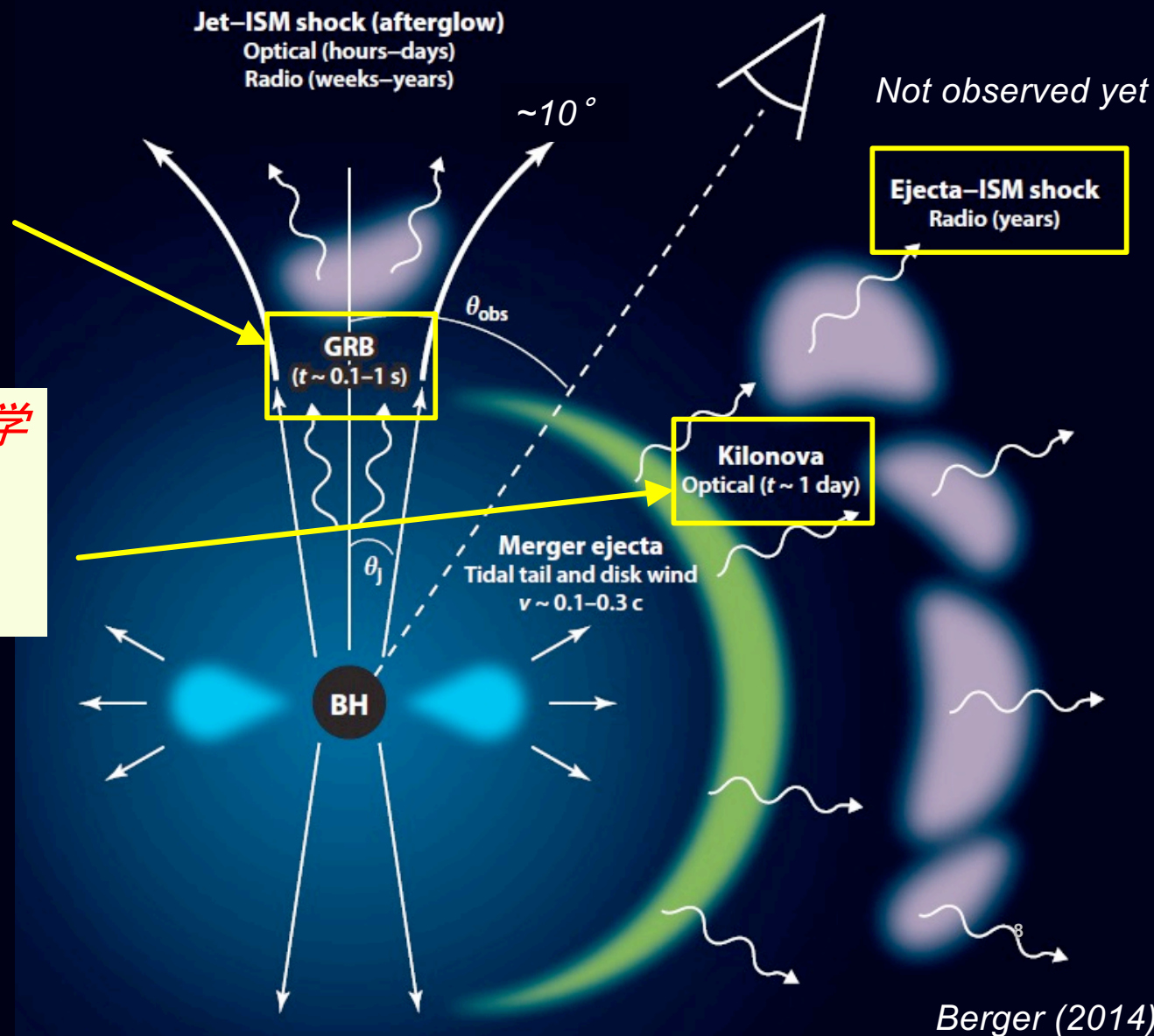
*Credit: LIGO Gallery*

フェルミガンマ線宇宙望遠鏡が  
GW170817の1.7s後に  
ショートガンマ線バースト  
GRB170817A を観測

重力波観測から11時間後に**光学**  
**対応天体**が観測され、さらに  
6時間後には**すばる望遠鏡**でも  
観測された。



Utsumi et al. (2017)





光学観測によりr-processの片鱗が観測された

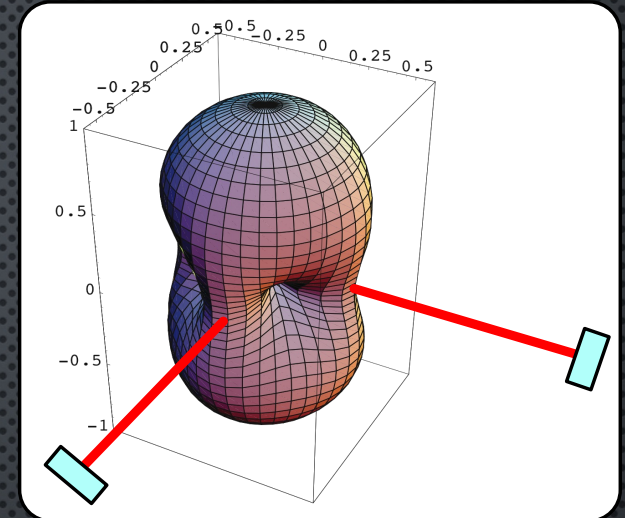
→ 金は連星中性子星合体でたくさん作られるらしい。



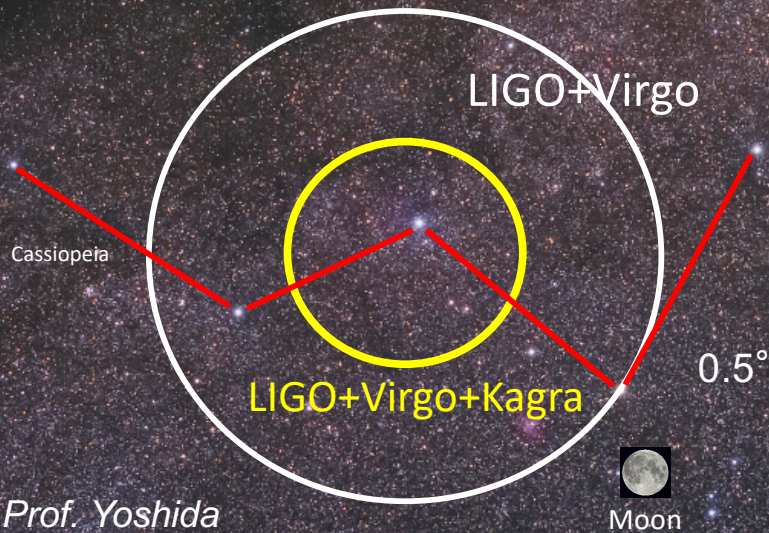
# 位置特定

重力波検出器のアンテナパターン

これまでにGW170817の1イベントしか、光学的なフォローアップ観測に成功していない。  
重力波望遠鏡の方向決定精度は極めて悪い。



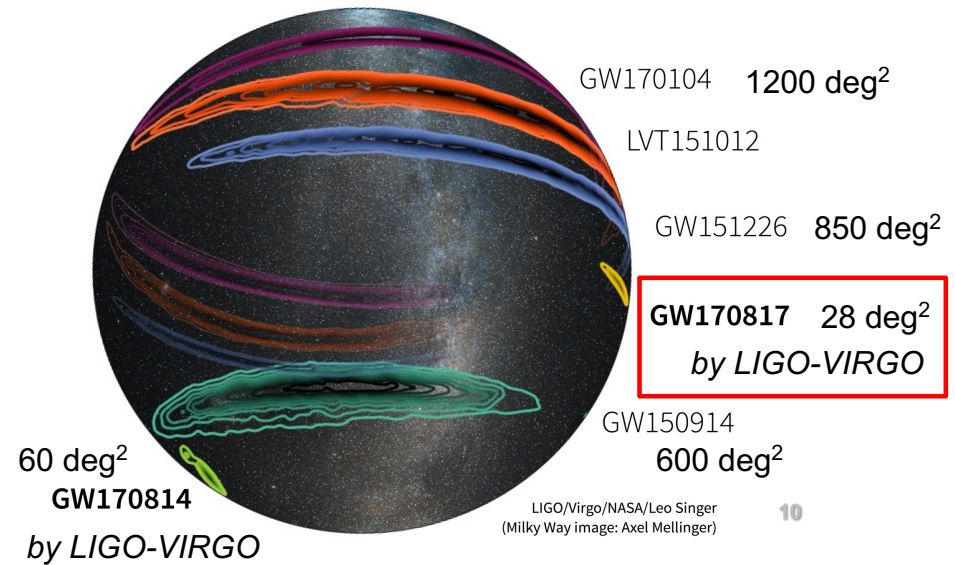
Source localization of GW telescopes



Slide from Prof. Yoshida  
in Subaru Telescope

New Eyes on the Universe

44



10

# 国際重力波観測ネットワーク

in 2020

**aLIGO** (Hanford), 4km  
108Mpc for NS-NS



**LIGO India**  
will start from  
2025



**KAGRA** (Kamioka), 3km  
started from 2019, ~1Mpc

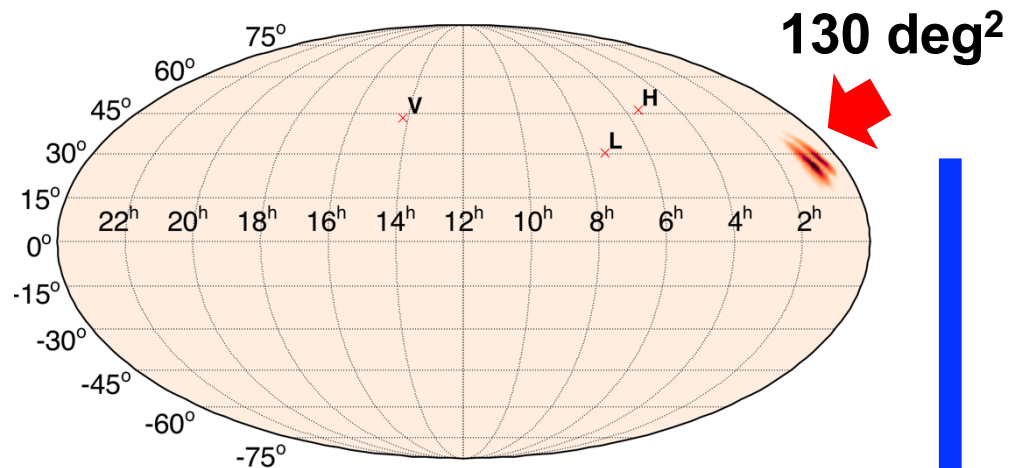


**aLIGO**  
(Livingston), 4km  
135Mpc

**aVIRGO** (Pisa), 3km  
~45Mpc

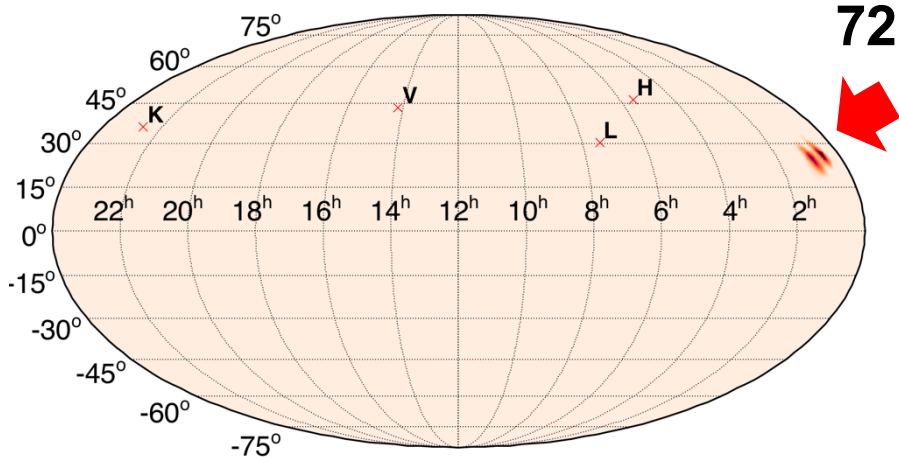
KAGRAが加わることにより  
イベント位置の特定精度は  
大きく向上すると期待出来る。

HLV

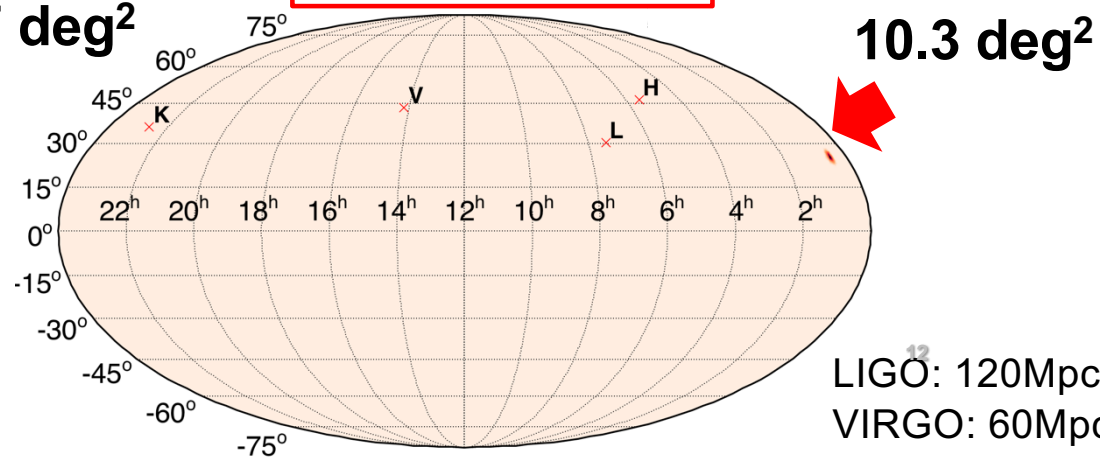


10 Times!

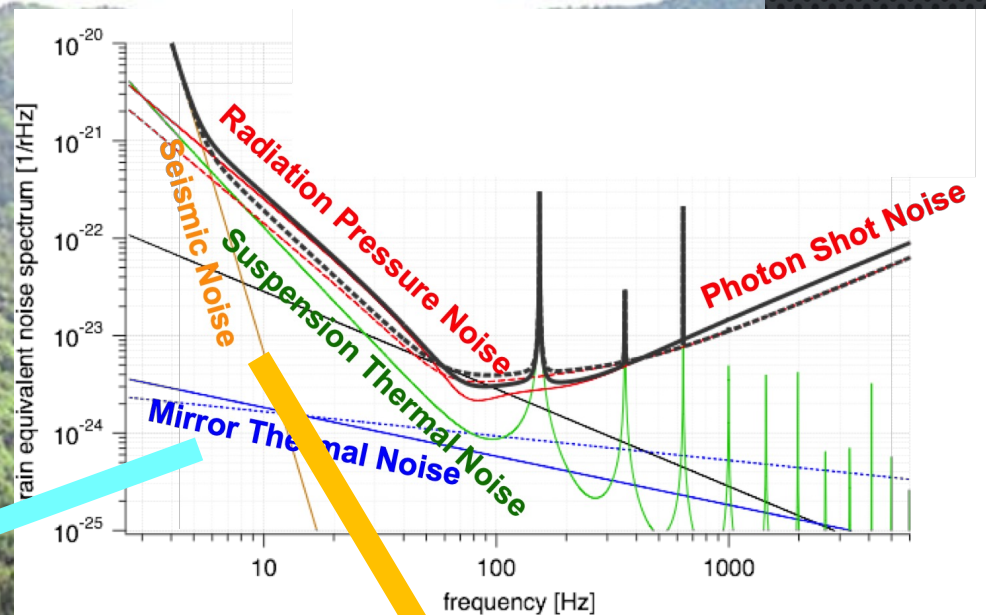
HLVK (8Mpc)



HLVK (25Mpc)



LIGO: 120Mpc  
VIRGO: 60Mpc



# 極低温サファイア鏡

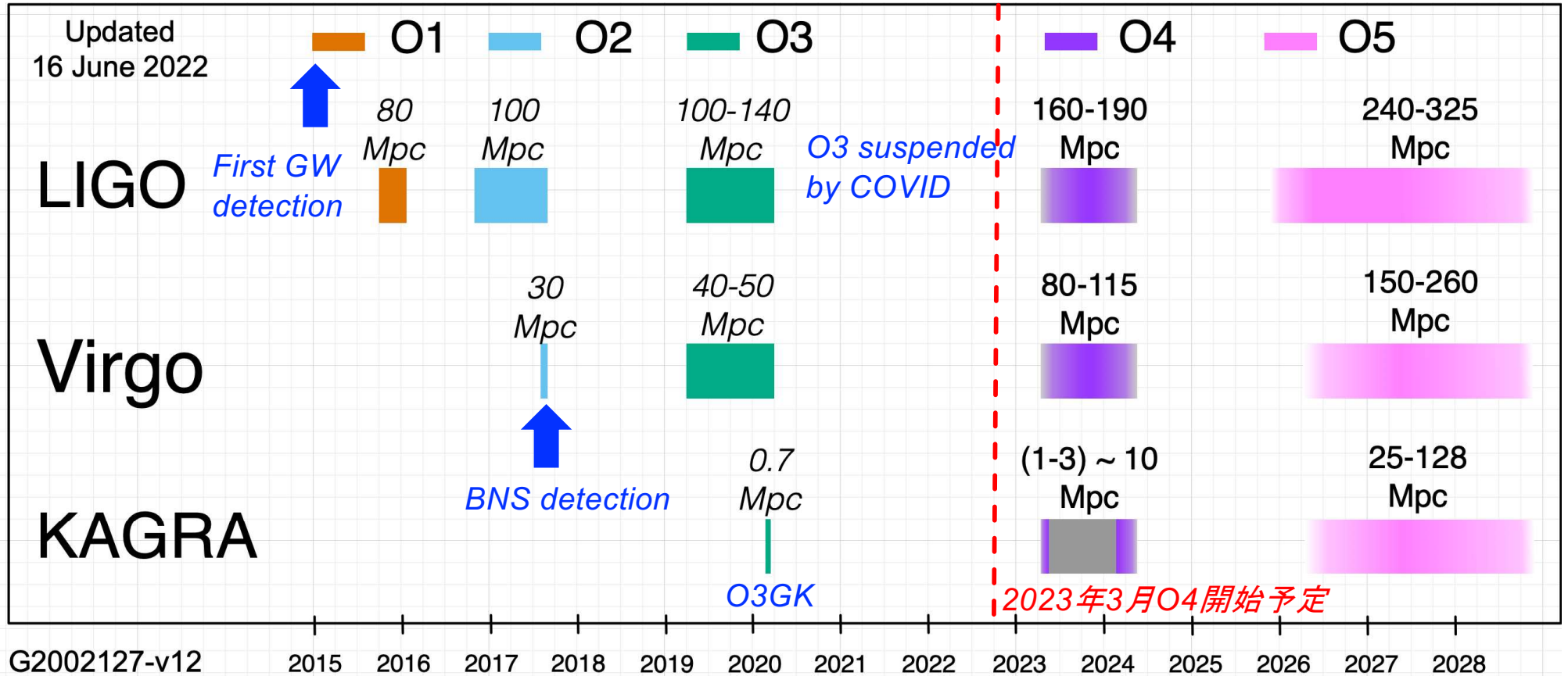
熱雑音の低減

振動ノイズの低減

# 地下サイト

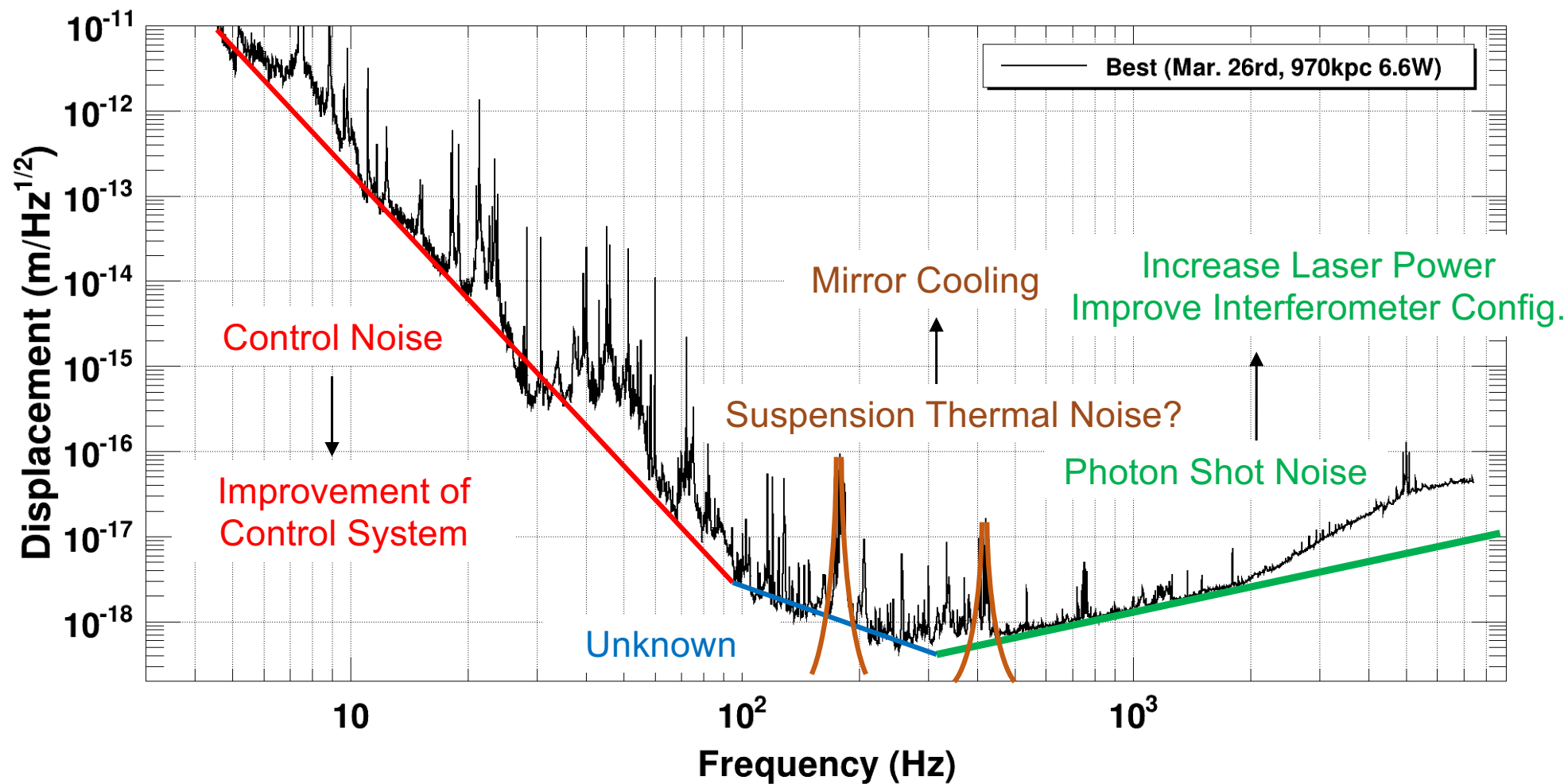


# 観測スケジュール



# O3GK時のKAGRA の感度

~ 1Mpc BNS range



T0=26/03/2020 12:07:00

Avg=1/Bin=95L

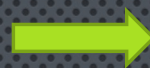
BW=0.0117098

# O4へ向けて

とにかくコミッショニング時間を  
十分取りたい・・・



2020.5  
- 2020.11



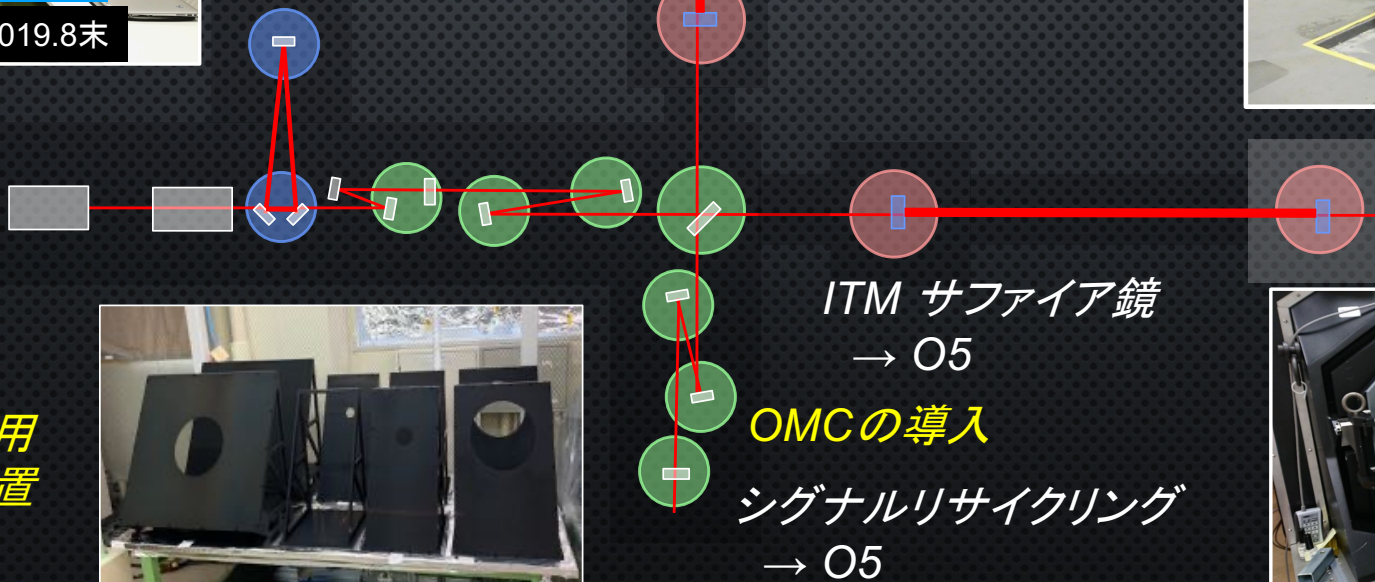
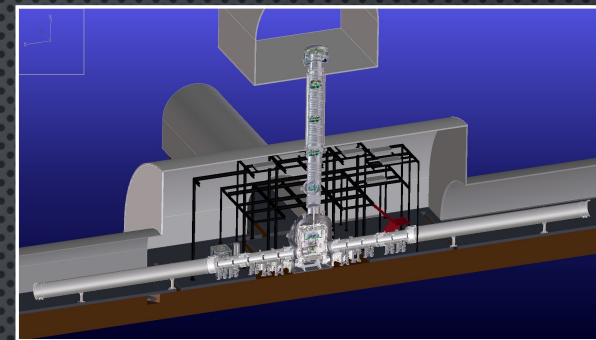
2020.10  
- ~2021.7

## 制御系の最適化

- ・イオンポンプの導入
- ・真空リークの補修
- ・モニター系の整備

- ・防振システムの改良
- ・加速度計の導入

## 小型冷凍機の交換



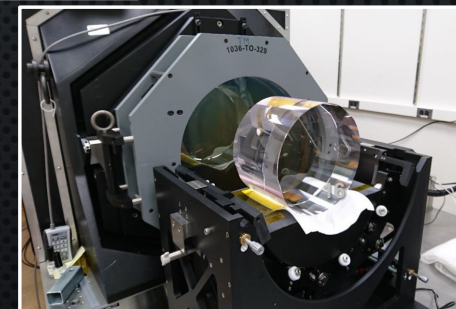
反射光・迷光  
・散乱光吸収用  
バッフルの設置



ITM サファイア鏡  
→ O5

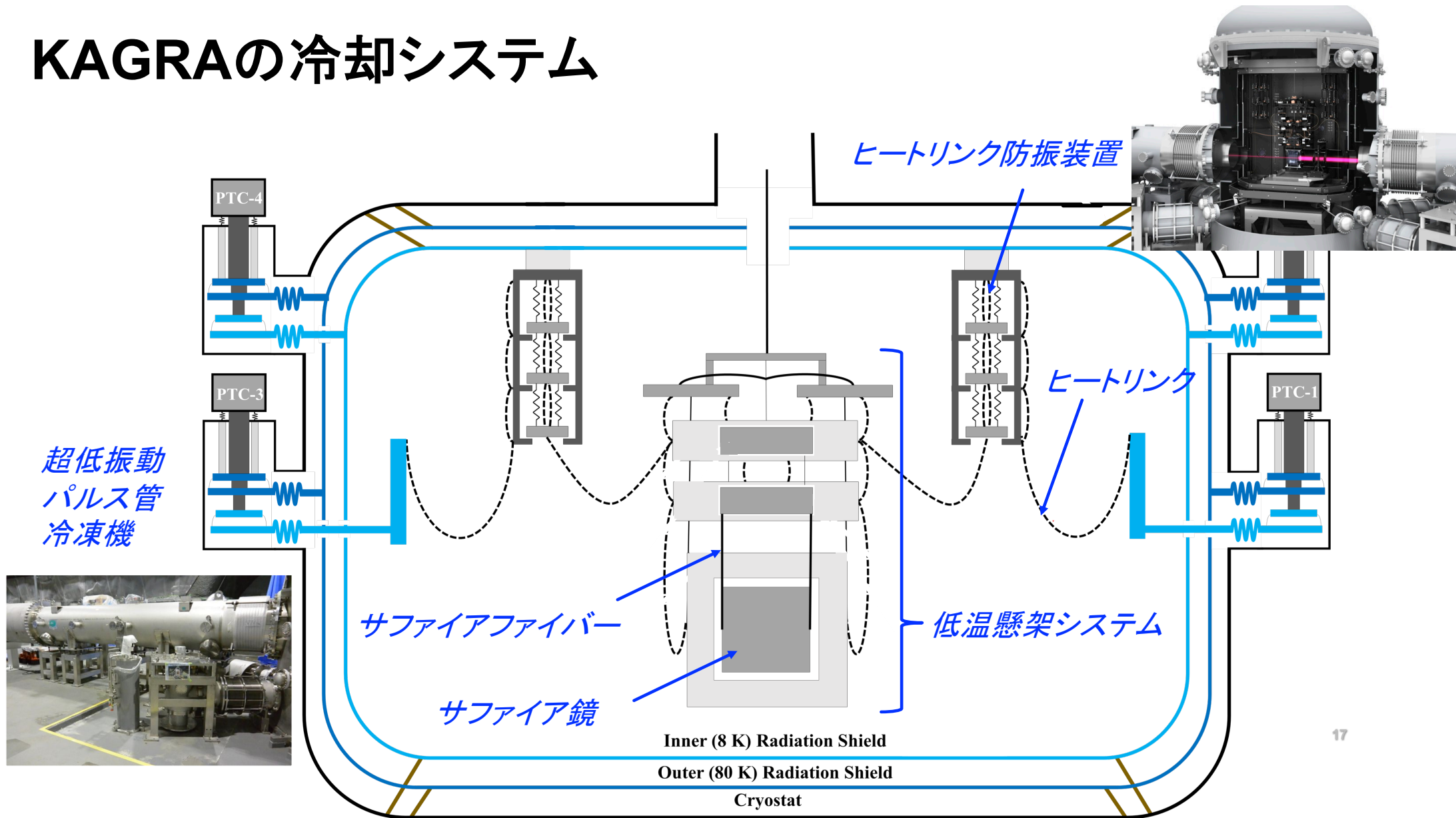
OMCの導入

シグナルリサイクリング  
→ O5



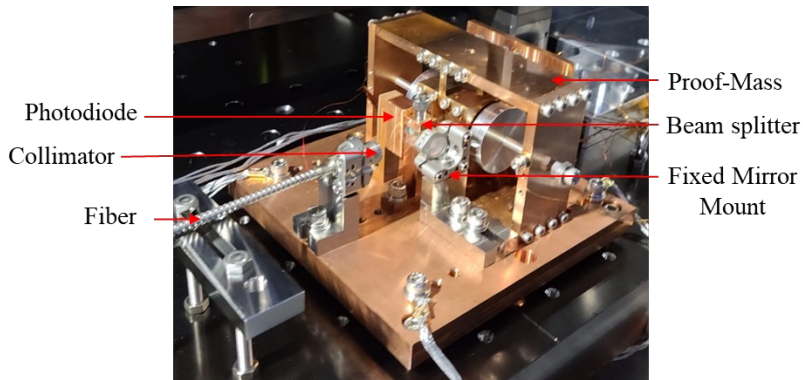
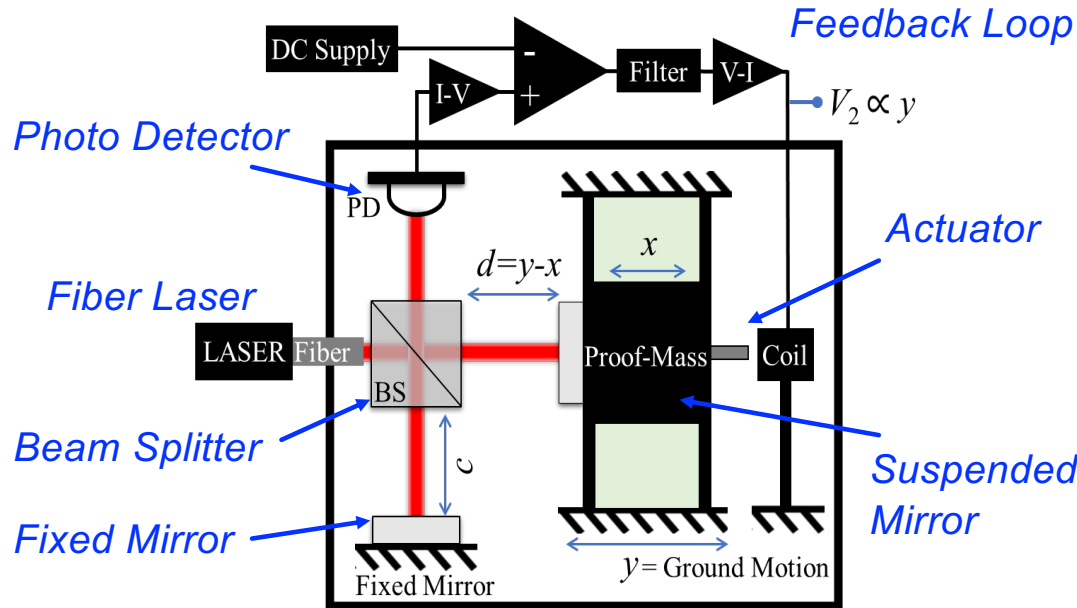


# KAGRAの冷却システム



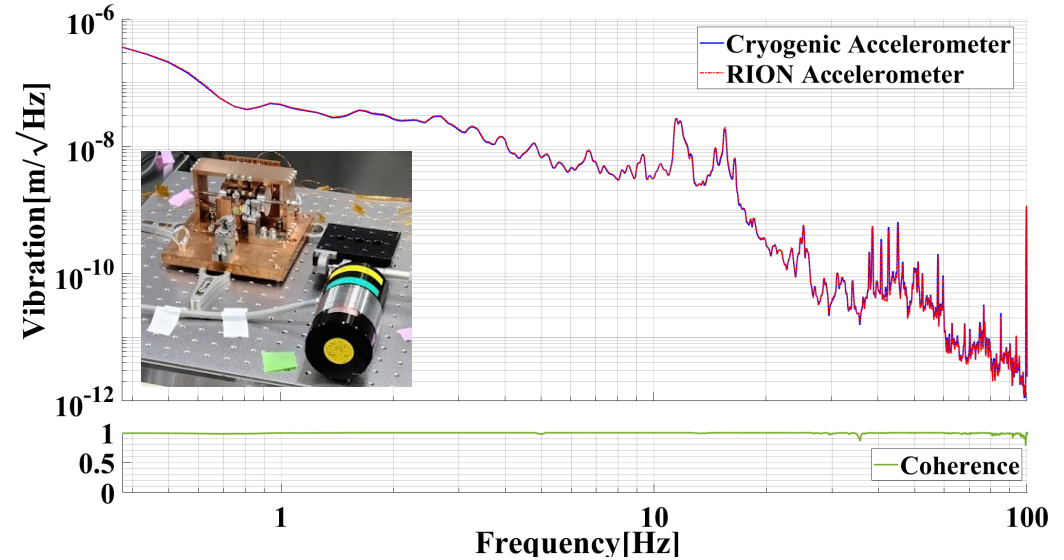
# 低温加速度計

## マイケルソン干渉計型



- Calibration : Self Calibrating
- Temperature : 10 K - 300K
- Sensitivity : Better than KAGRA seismic motion in 0.1-100 Hz range

## 性能確認 @300K

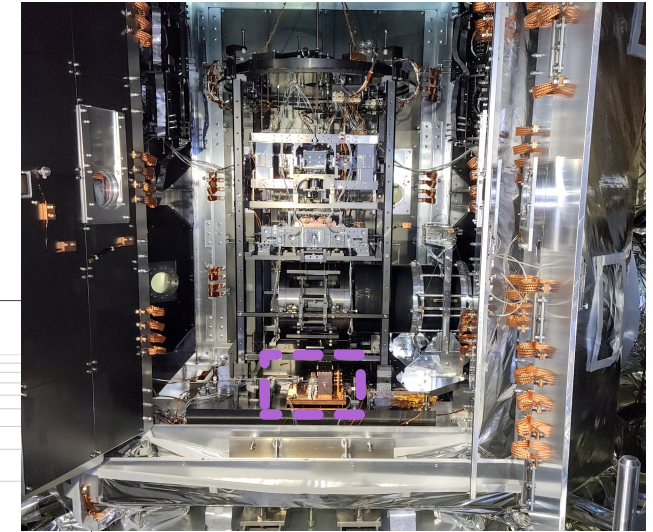
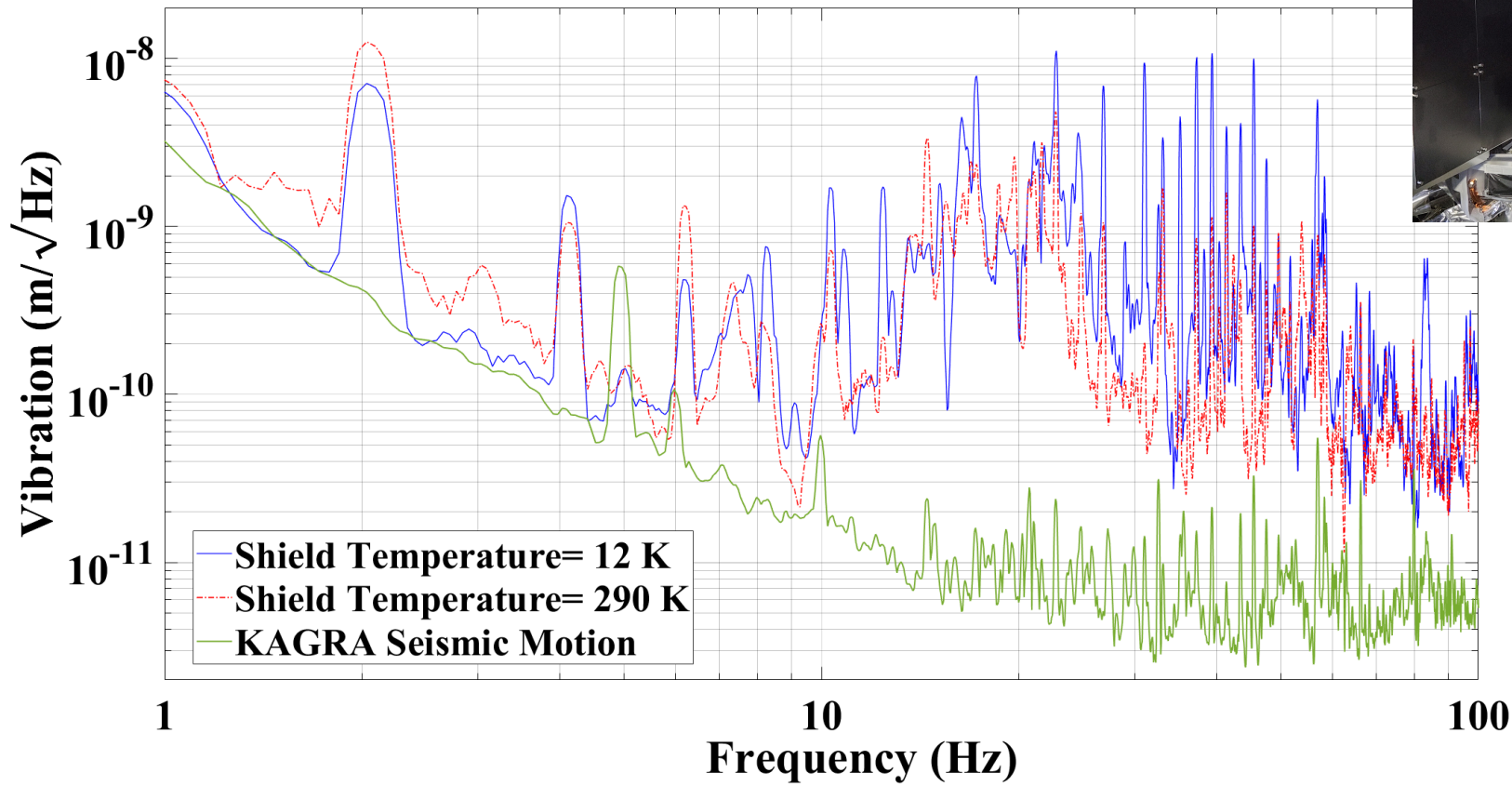


12Kの極低温でも安定に動作。  
達成した感度レベル

$$3.3 \times 10^{-11} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \quad @ 1 \text{ Hz}$$

R Bajpai et al 2022 Meas. Sci. Technol. **33** 085902

# KAGRA クライオスタットの振動スペクトル



# 超高純度アルミニウム撚り線型ヒートリンク

撚り線のばね定数は、同じ  
断面積なら単線よりもずっと  
小さくなる。  
(サイズ効果が効かない場合)

$$k = \frac{p^2}{N}$$

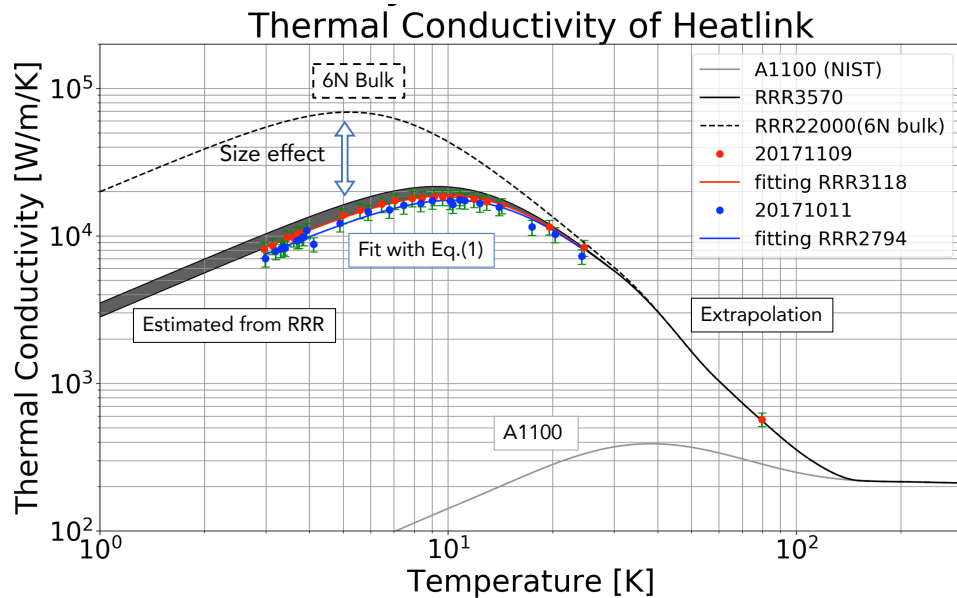
Thin wire  
( $\phi 0.15$  mm)

7-wire strand  
( $\phi 0.15$  mm  $\times$  7)

49-wire strand  
( $\phi 0.15$  mm  $\times$  7  $\times$  7)



Stranded-cable type heat link ( $\phi 0.15$  mm  $\times$  7  $\times$  7  $\times$  7)



6Nアルミではすでにサイズ効果の影響が  
現れている。

T. Yamada, PhD thesis, Univ. Tokyo (2021)

## Result (Resonant frequency)

	Area	5N	6N
$\phi 1$ mm single	0.8 mm <sup>2</sup>	64 Hz	64 Hz
45 wires strand	0.8 mm <sup>2</sup>	9.6 Hz	9.8 Hz

$$k \propto f^2 \quad 1/6.5$$

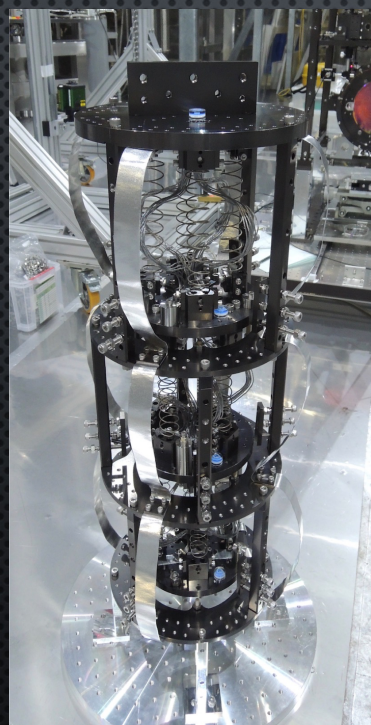
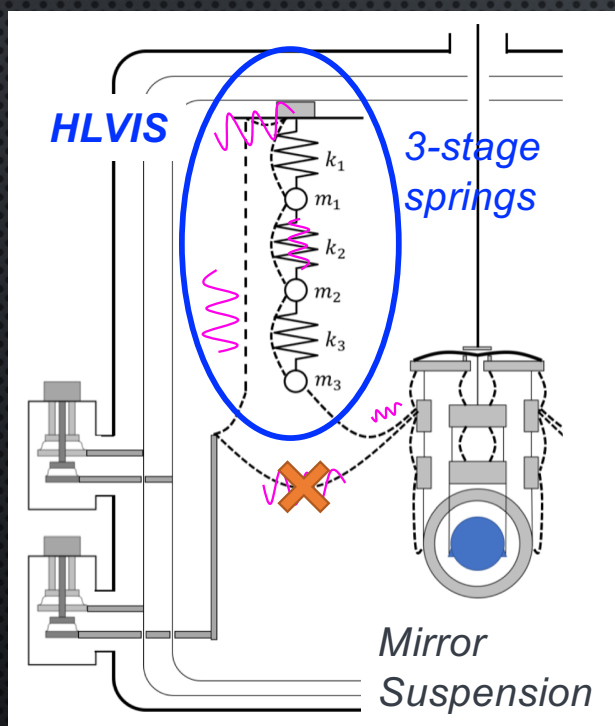
Spring constant: 1/43

# ヒートリンク防振装置

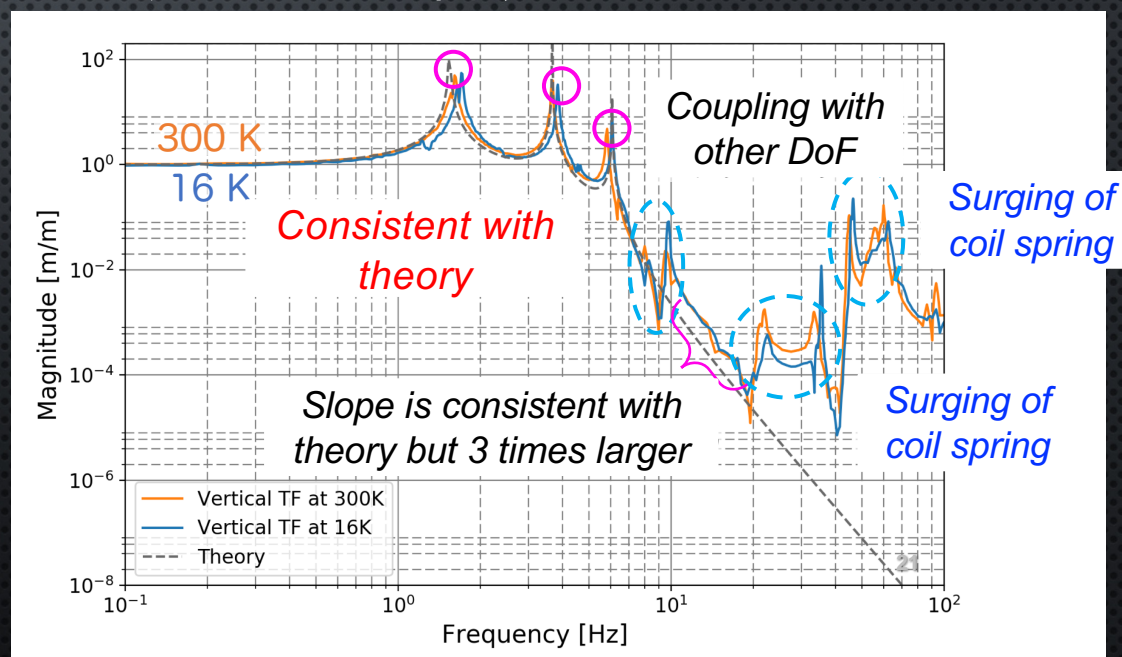
T. Yamada, PhD thesis  
Univ. Tokyo (2021)

6N撚り線型ヒートリンクは高伝熱・低振動に非常に有効。  
しかし、縦方向の振動はKAGRAの要求を充たさないことが判明

➡ ヒートリンクの縦防振装置(3段バネ式)を導入

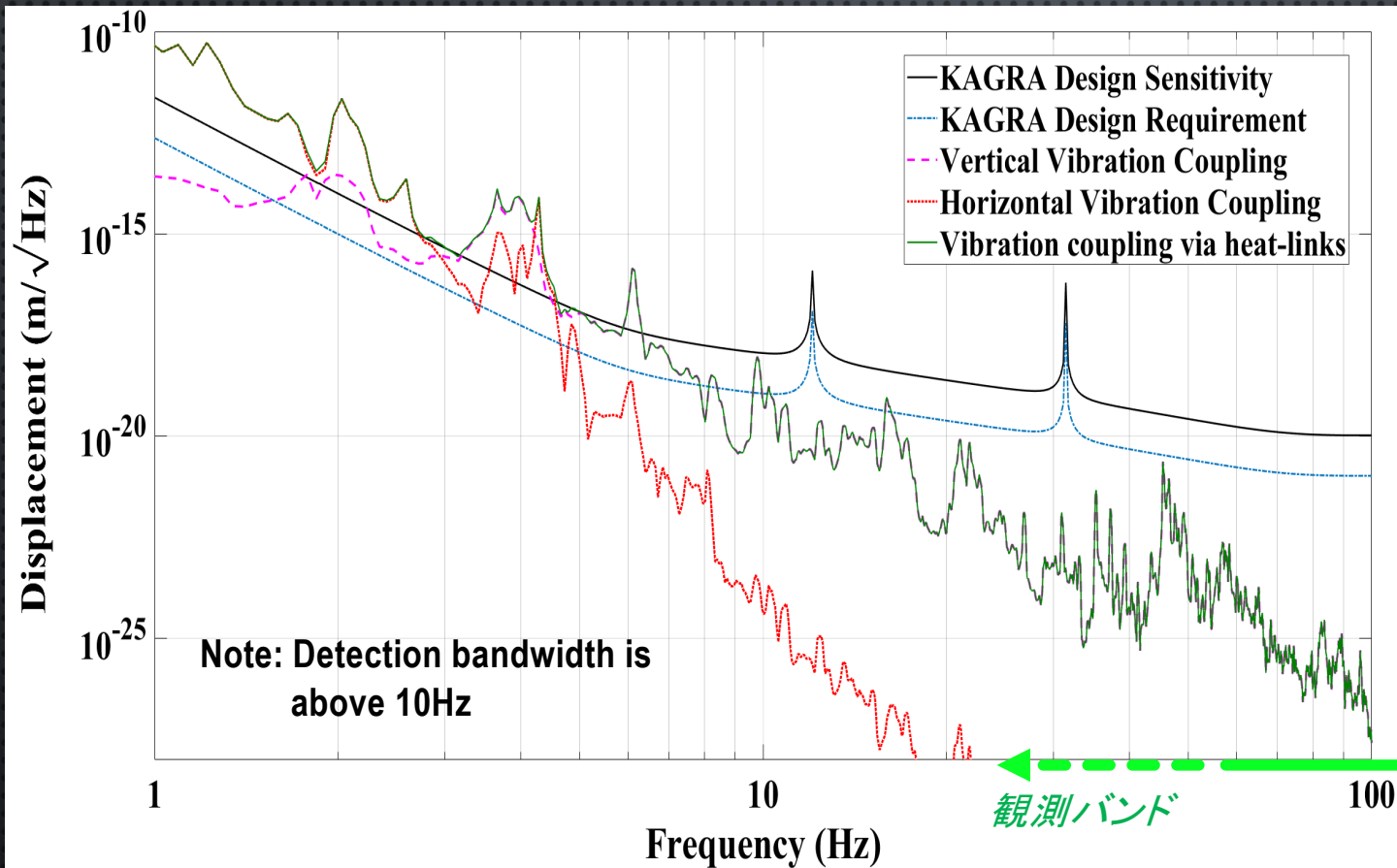


測定された伝達関数



# 推定される鏡の振動レベル

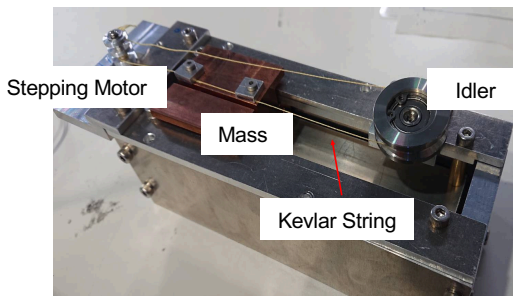
Condition: 4-Mirrors in total, Each mirror is cooled by 4-HL



KAGRAの要求を充たす。

# 極低温鏡懸架システムの制御

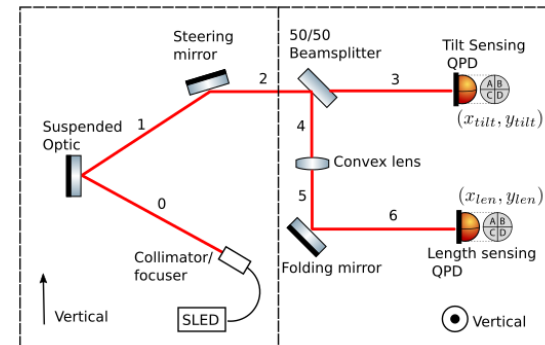
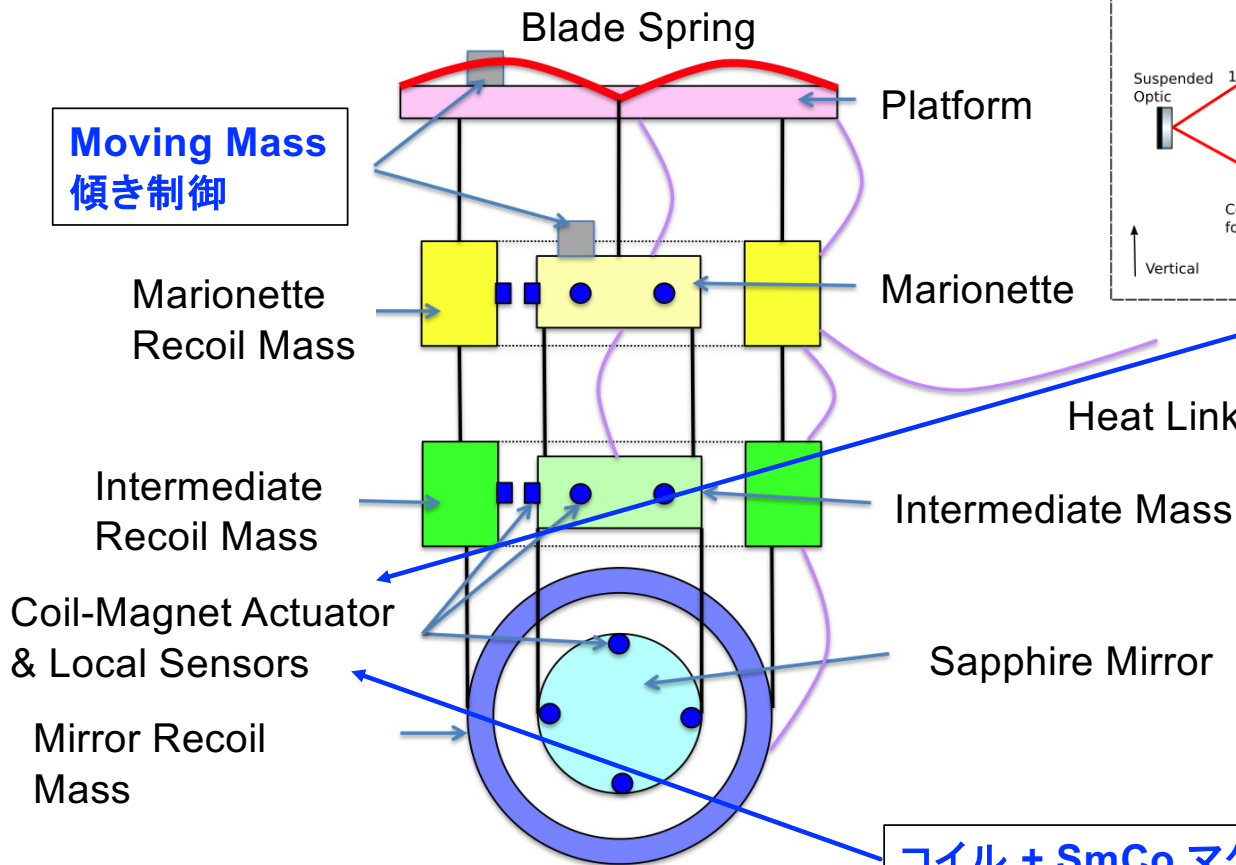
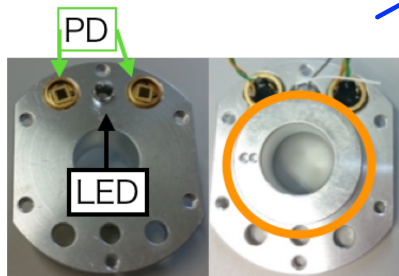
[https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/DocDB/0057/T1605788/011/length\\_sensing\\_oplevs.pdf](https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/DocDB/0057/T1605788/011/length_sensing_oplevs.pdf)



T. Nishimoto, Master thesis, Univ. Tokyo (2020)

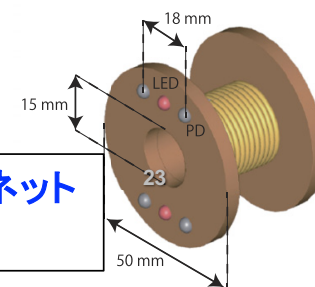
**Moving Mass  
傾き制御**

**光反射型変位センサー**



**傾き & 長さ  
計測用光テコ式  
センサー**

**コイル + SmCo マグネット  
アクチュエーター**



M. Fukunaga, Master thesis, Univ. Tokyo (2019)  
T. Ushiba et al, Class. Quantum. Grav. 38, 085013 (2021)

# Einstein Telescope

European 3<sup>rd</sup> Generation GW Telescope

建設開始: 2027年頃 (9年間)

観測開始: 2036年頃

- 10km基線長の三角形
- 3つの高周波望遠鏡  
+ 3つの低周波望遠鏡  
(マイケルソン干渉計型)

- 地下サイト
- 極低温鏡

- 総建設費: 約1.9 BE (~2,600億円)
- イタリア・サルディニア島 or  
オランダ・マーストリヒト or  
ドイツ・ザクセン?
- European Strategy Forum on Research  
Infrastructures のロードマップ2021に掲載

BBH:  $z \sim 50$ ,  $10^6$  個/yr

BNS:  $z \sim 2$ ,  $10^5$  個/yr



# 重力波天文学

様々な周波数帯で新しいサイエンスを開拓

