

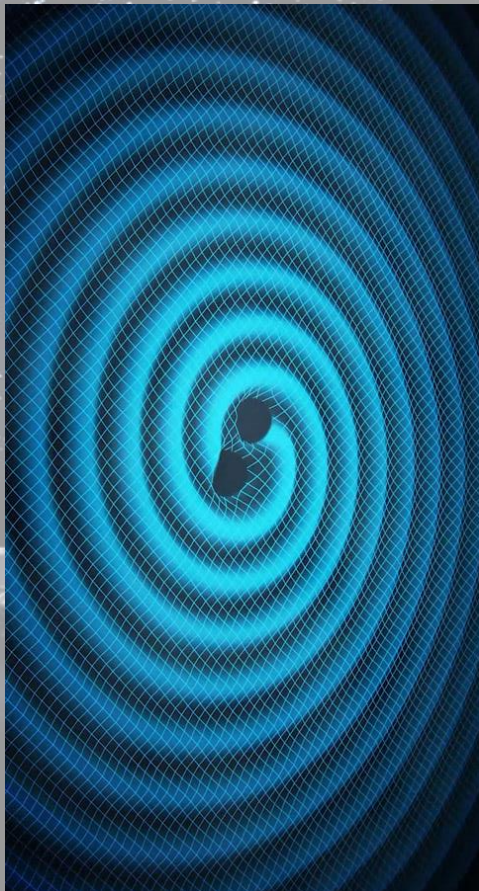
# KAGRAにおける環境雑音



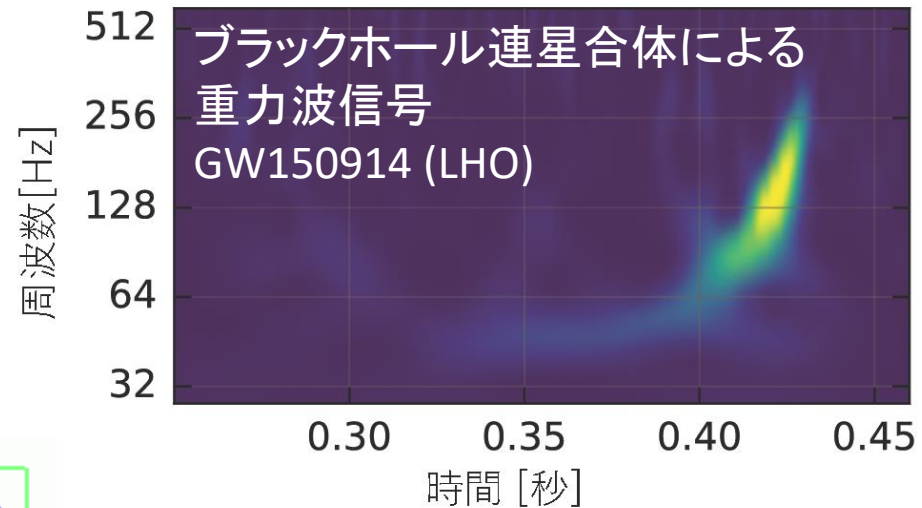
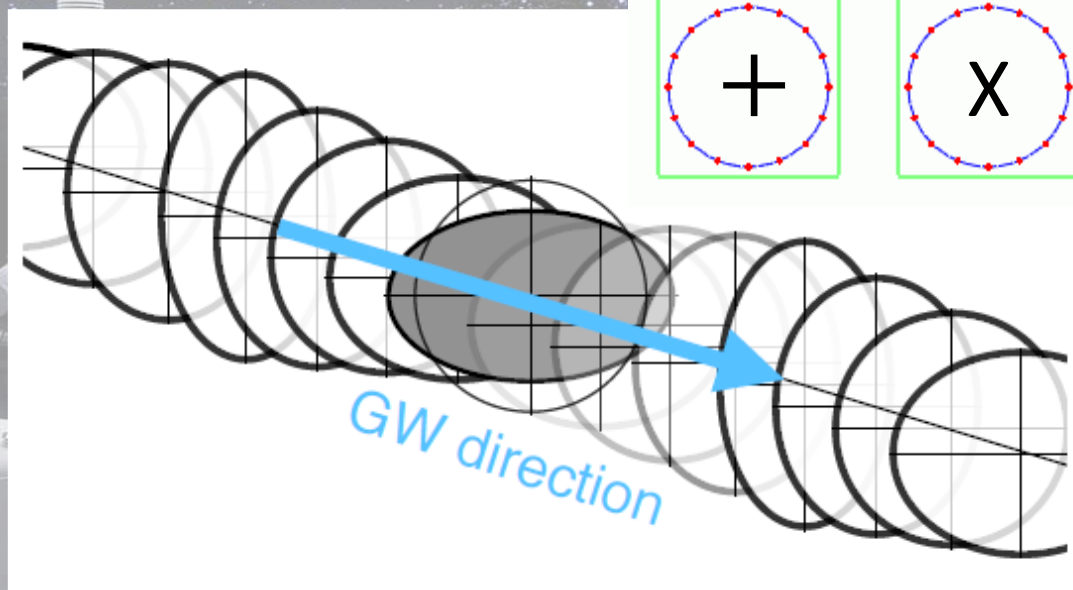
2021-11-25 第2回新学術「地下宇宙」若手研究会  
国立天文台重力波プロジェクト 鷲見貴生



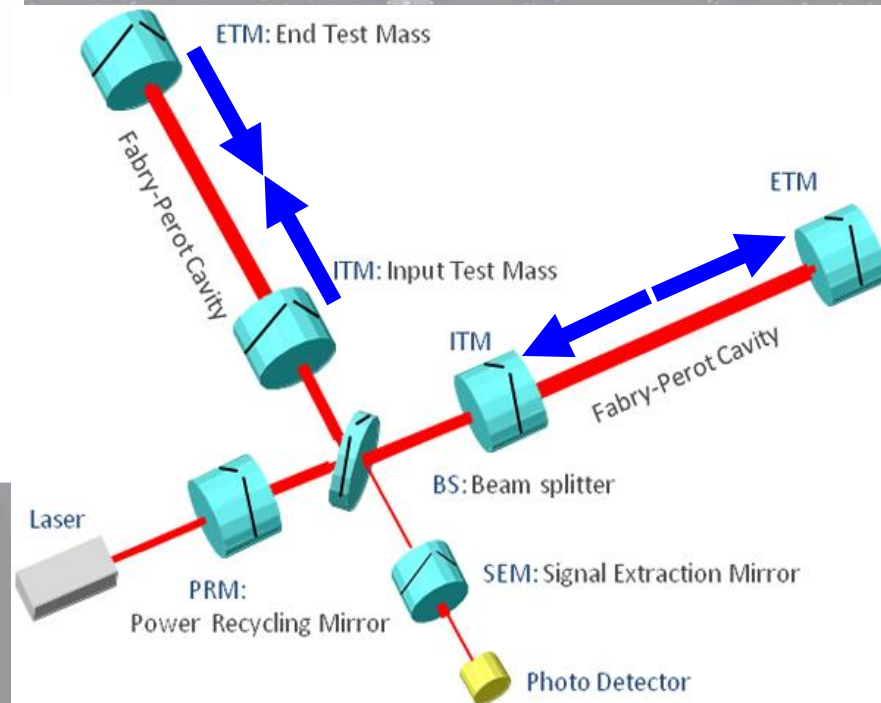
# 重力波と重力波望遠鏡



非常に重い天体が超高速で運動すると、  
時空のゆがみが波となって伝搬する。  
+モードとXモードの2つの振動成分がある。



2本の”腕”を持つレーザー干渉計を用いて検出する。  
「望遠鏡」とは言うが、一台では到来方向がわからないため、複数  
台で同時観測を行う必要がある。

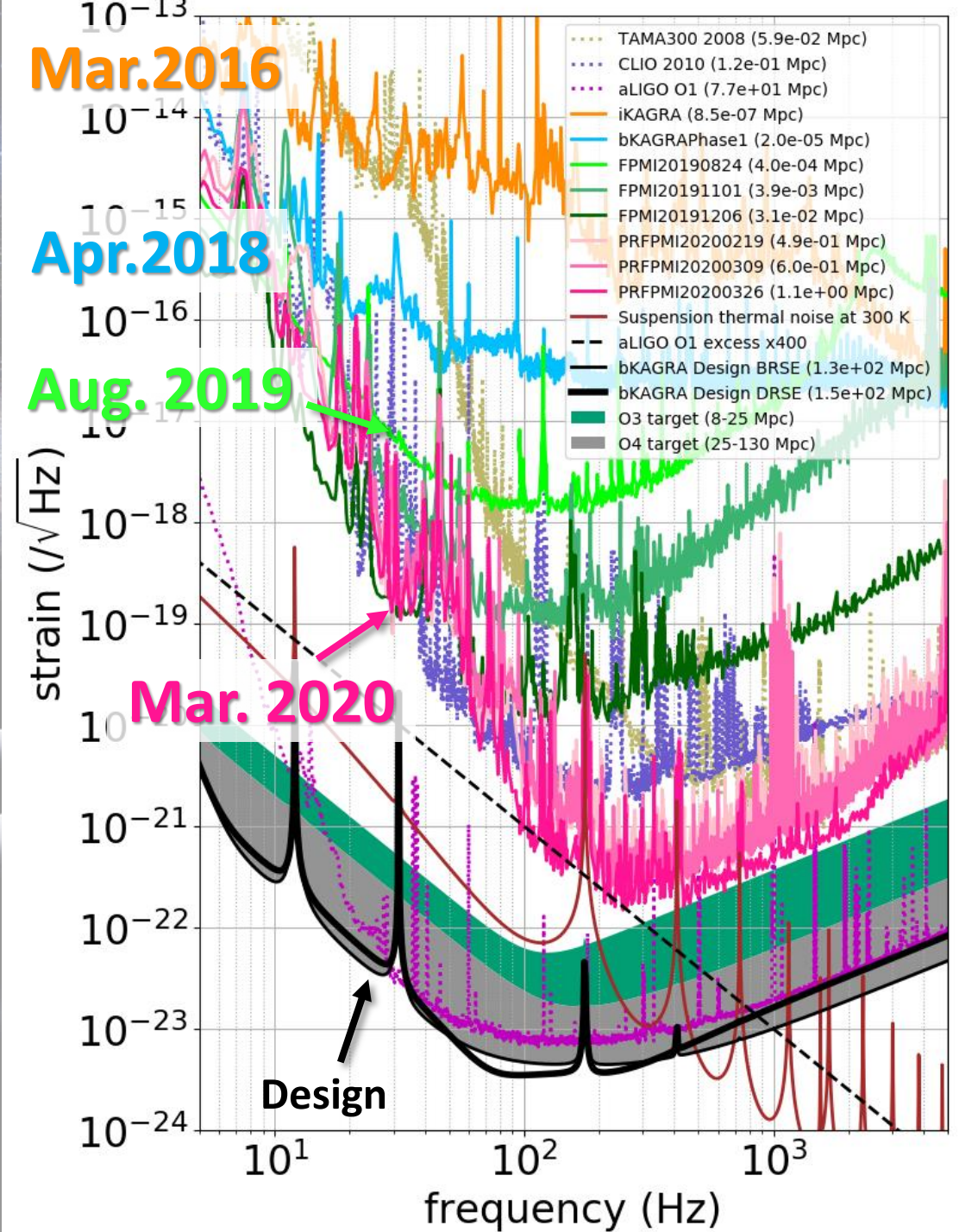




# KAGRA

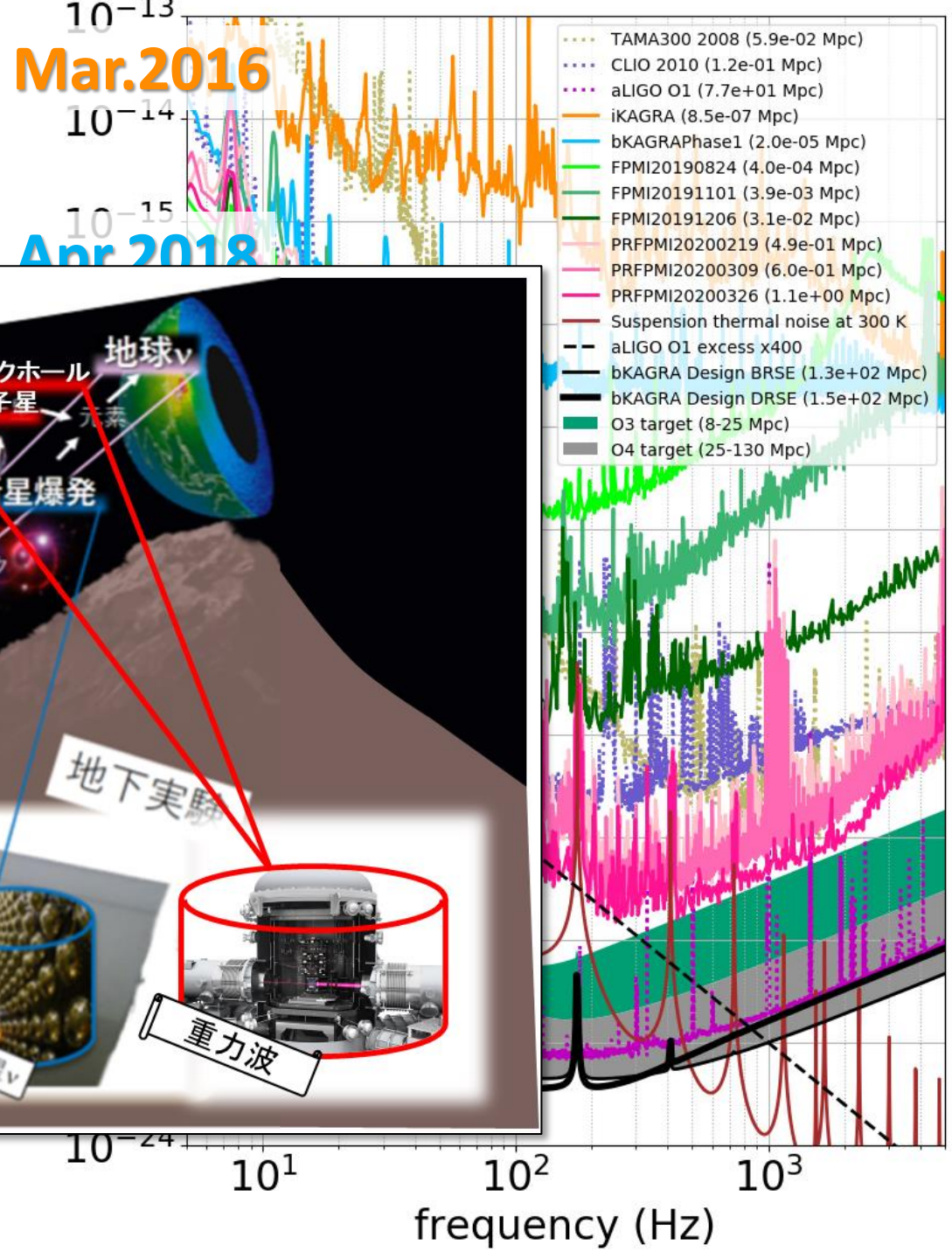
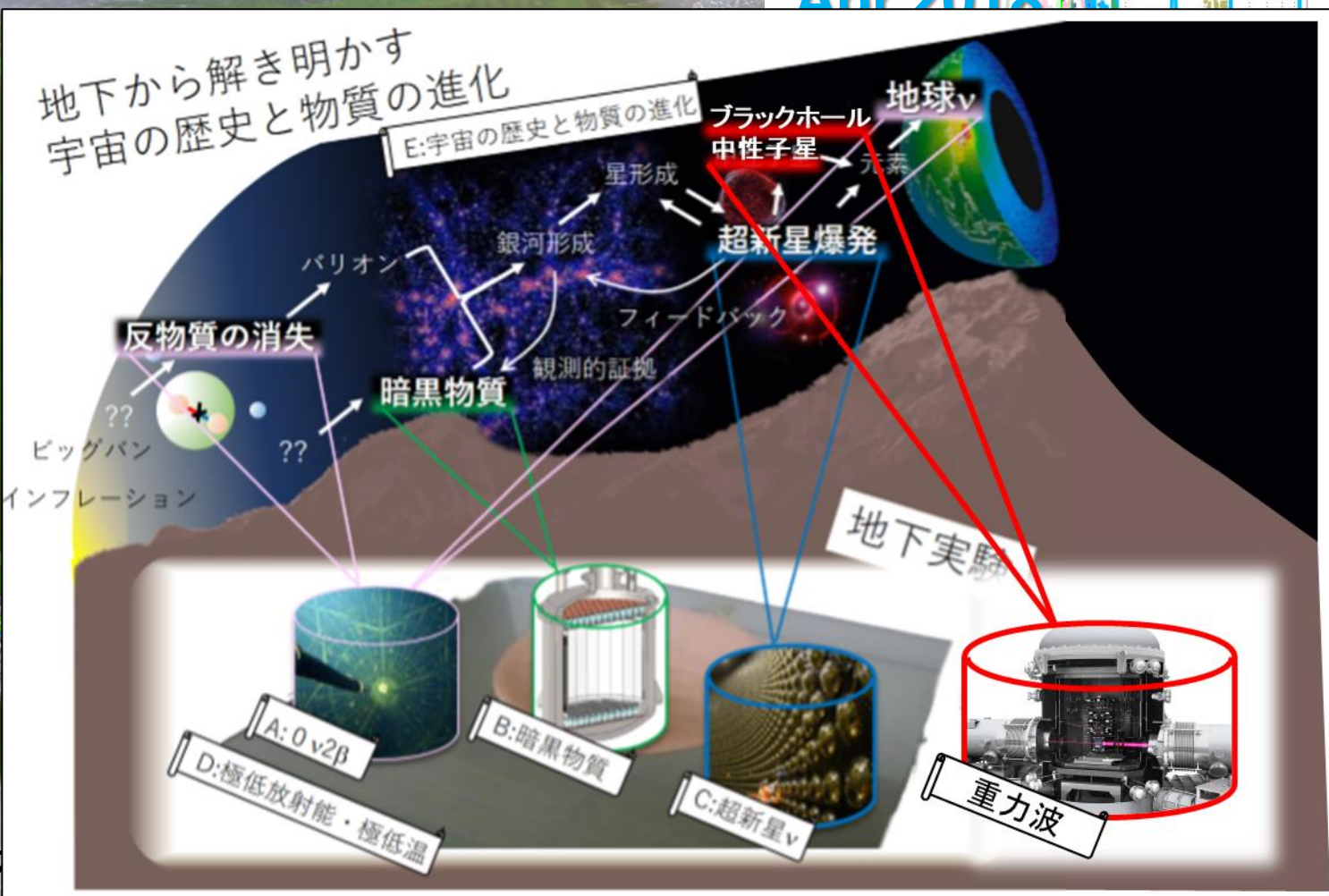


- 神岡地下に建設されたレーザー干渉計型重力波検出器
- 2020年4月にドイツのGEO600との共同観測を実施
- 2022年12月にLIGO/Virgoとの共同観測を開始予定





# KAGRA



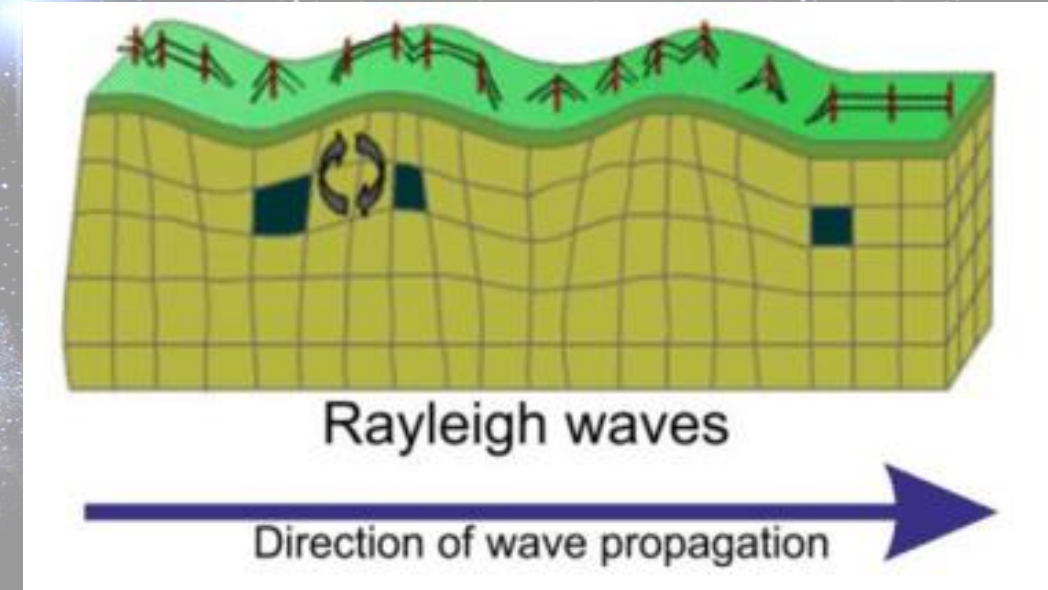
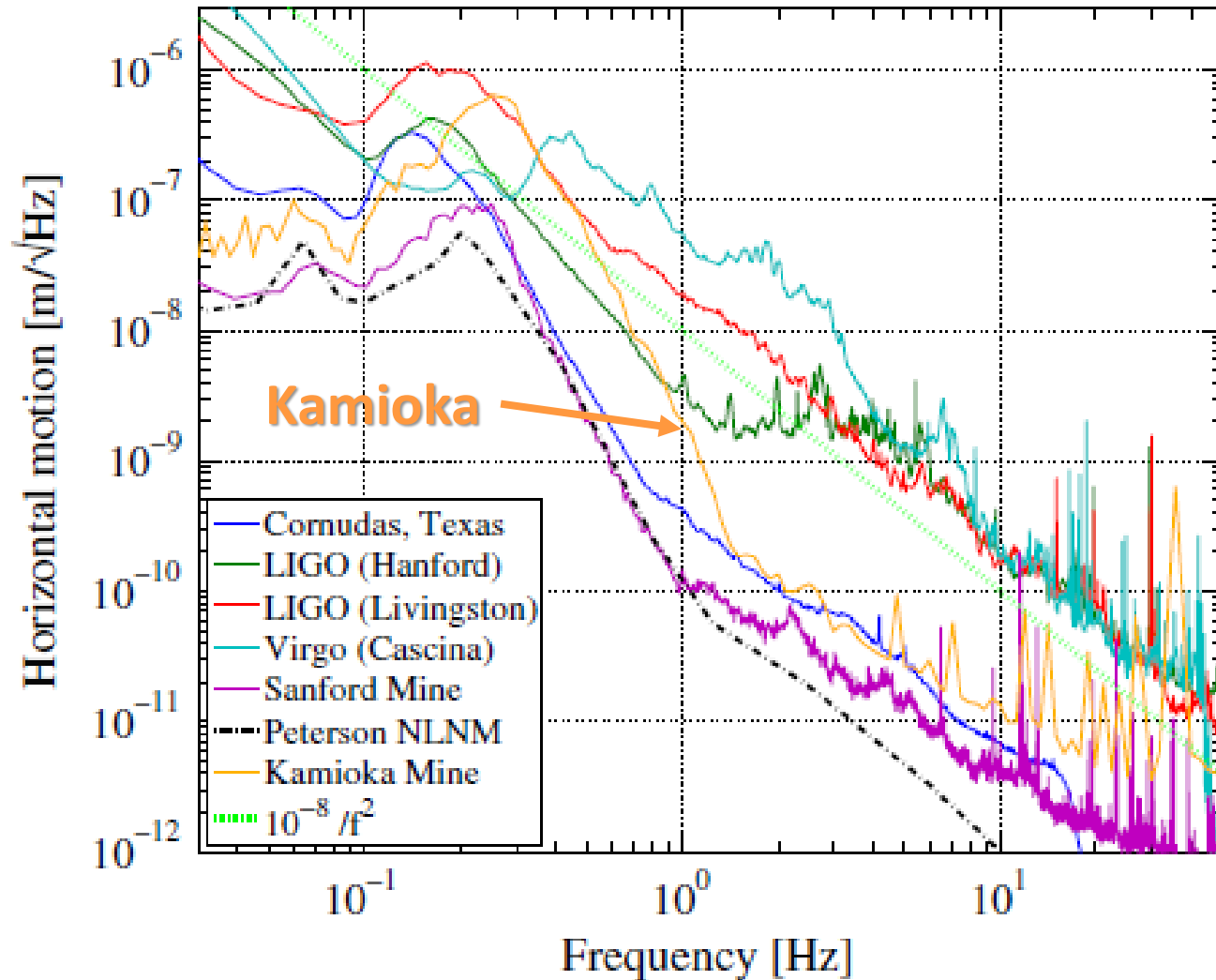
- 神岡地下に建設され、
- 2020年4月にドイツのGEO600との共同観測を実施
- 2022年12月にLIGO/Virgoとの共同観測を開始予定



# 地上と地下の地面振動

Seismic wave (Rayleigh) propagate mainly on surface.

➤ Seismic level is reduced  $O(100)$  for  $> 1\text{Hz}$ .



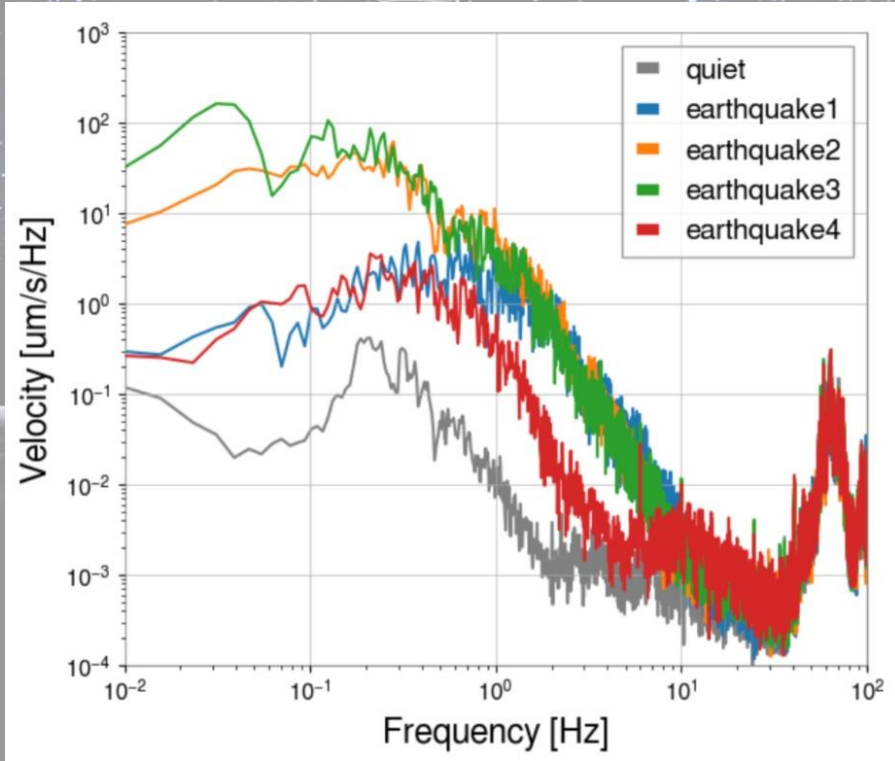
地上

地下



# 地震

- 地震の周波数は重力波観測帯域(5~5kHz)よりも低いため、偽イベントになることはない



- 干渉計の”ロックロス”を引き起こし、観測が一時中断してしまう
- 神岡では東側で起きた地震の影響が小さい⇒

## 先日の大地震でも飛騨地方は震度ゼロ…まるで「山神」がいるみたい！？ 飛騨山脈の地震減衰効果に注目集まる

<https://maidonanews.jp/article/14204489?p=25461832> 2021.02.23(Tue)

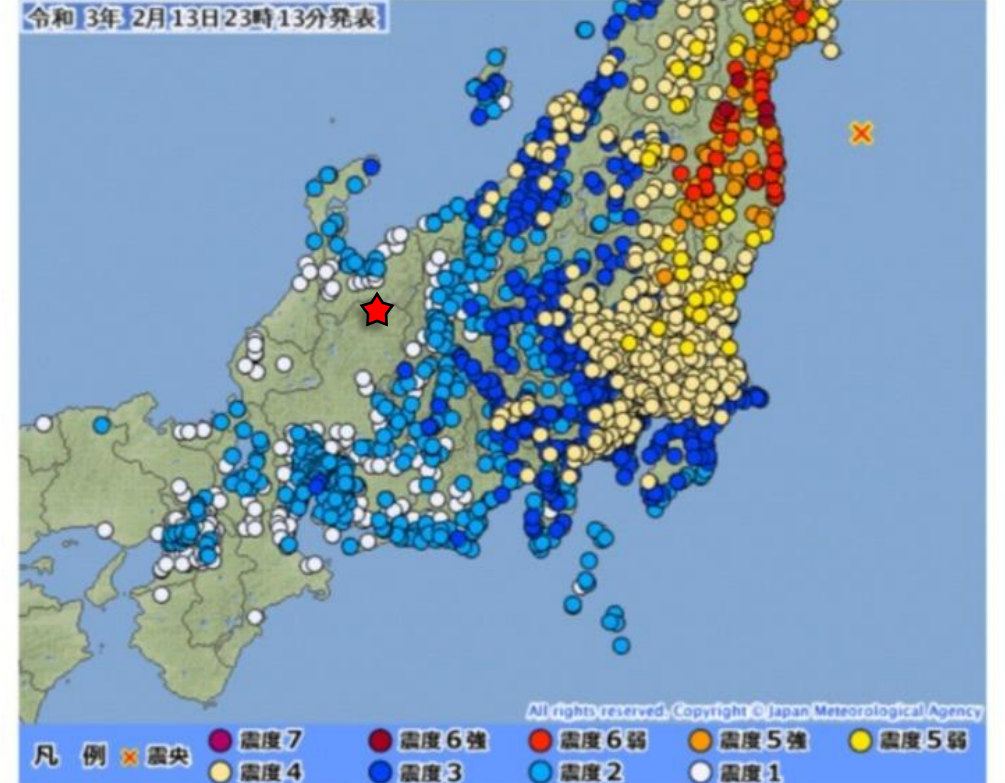
中将 タカノリ

【各地の震度に関する情報】震度1以上を観測した地点と地震の発生場所（震源）やその規模（マグニチュード）の情報

全国表示

地図をクリックすると拡大できます。

説明へ





# 重力波観測における環境雑音

## 地面振動

- 地震や波浪、機械など
- 鏡や真空容器を揺らす



## 音響雑音

- 実験装置や空調設備など
- 鏡や真空容器を揺らす



## 電波・電位差

- 電子機器など
- エレキノイズになる



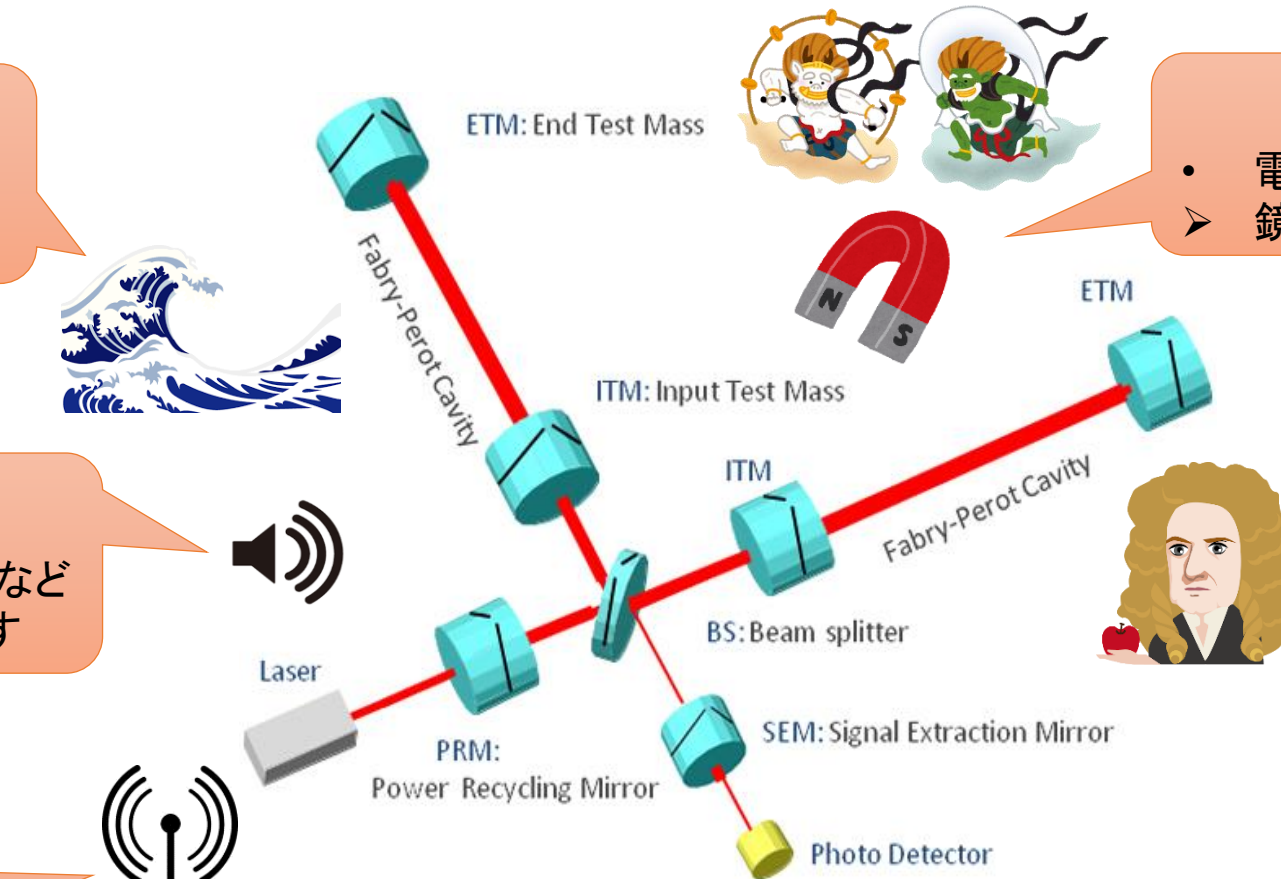
## 磁場雑音

- 電子機器や落雷など
- 鏡を揺らす・エレキノイズになる



## 重力場雑音

- 周りの物質の運動
- 鏡を揺らす



➡ **Targets of Physical Environmental Monitoring (PEM)**

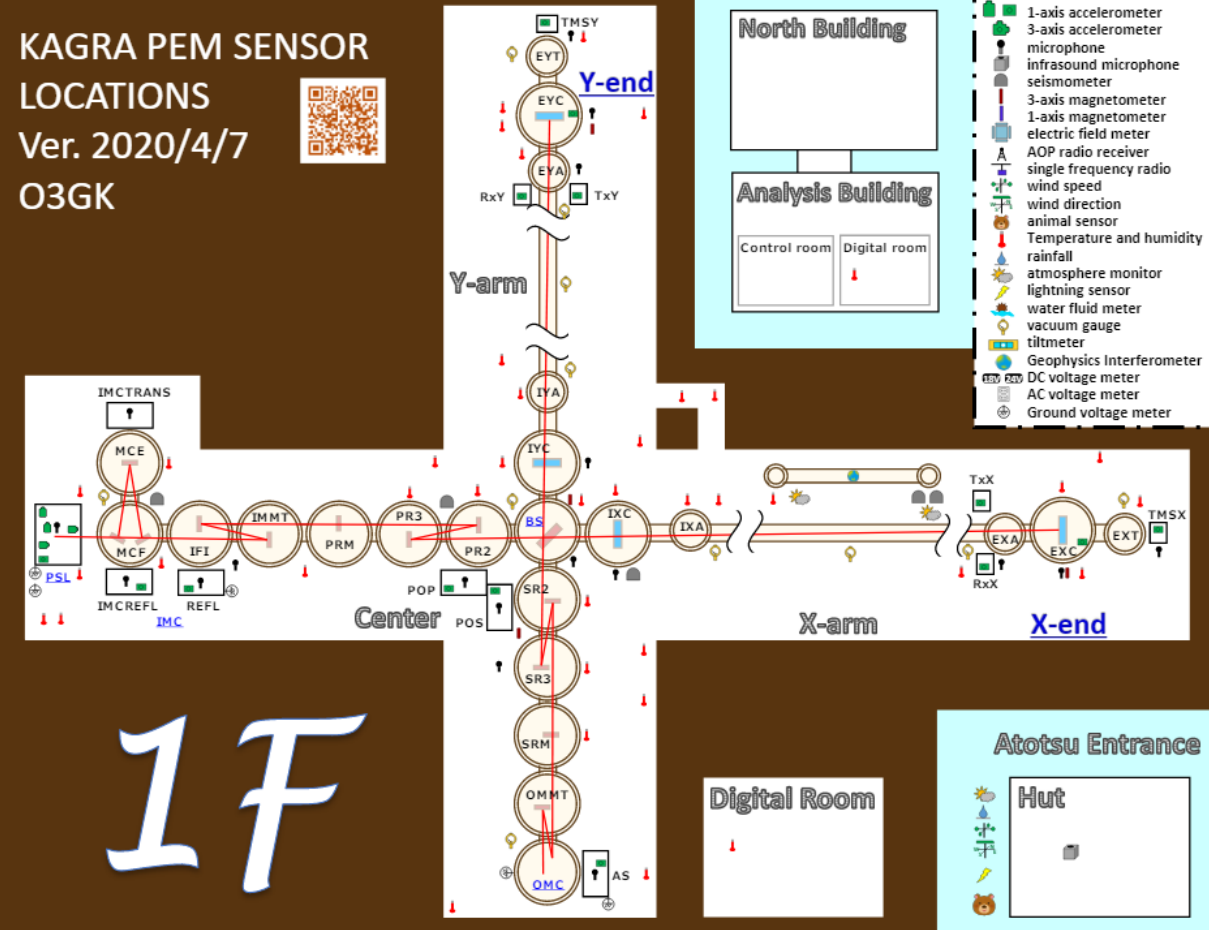
# Physical Environmental Monitoring (PEM)

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~washimi/KAGRA/PEM/PEMmap/archives/O3GK/>

KAGRAトンネル内外に様々なセンサーを設置し、ありとあらゆる環境を常にモニターしている。

[Prog. Theor. Exp. Phys., 2021, Issue 5, 05A102](#)

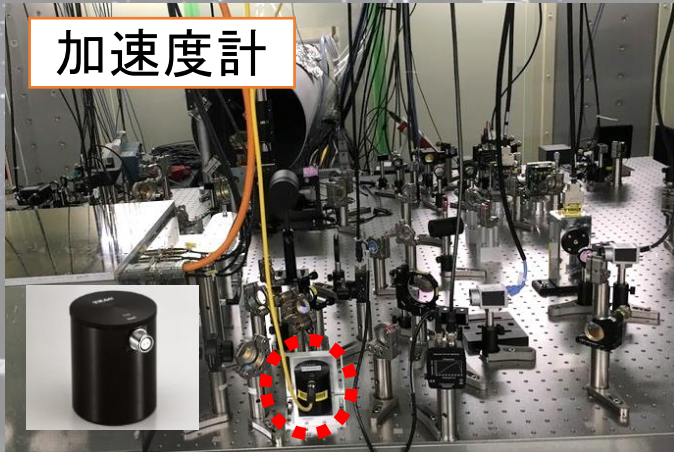
KAGRA PEM SENSOR  
LOCATIONS  
Ver. 2020/4/7  
O3GK



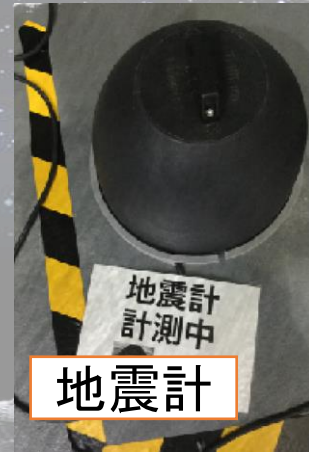
# 1F

直接的な雑音となる重力波観測帯域(10 Hz~数kHz)だけでなく、up/down conversionによる雑音や干渉計制御に影響する量(基線長、室温など)の長期モニターも行っている

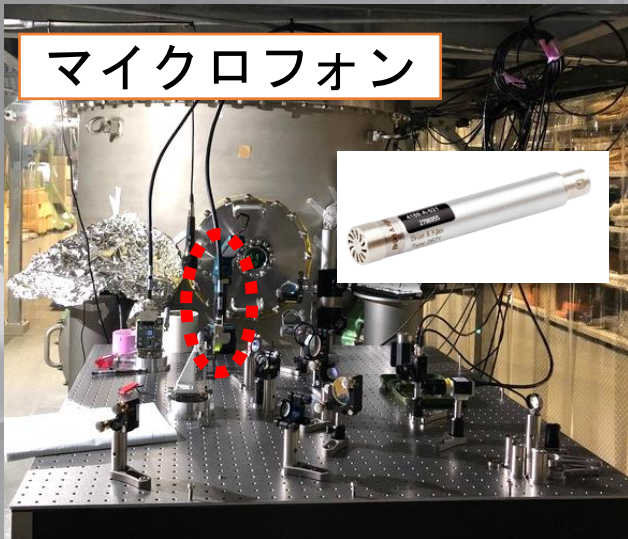
加速度計



地震計



マイクロフォン



磁力計



気象計&  
雷検知器





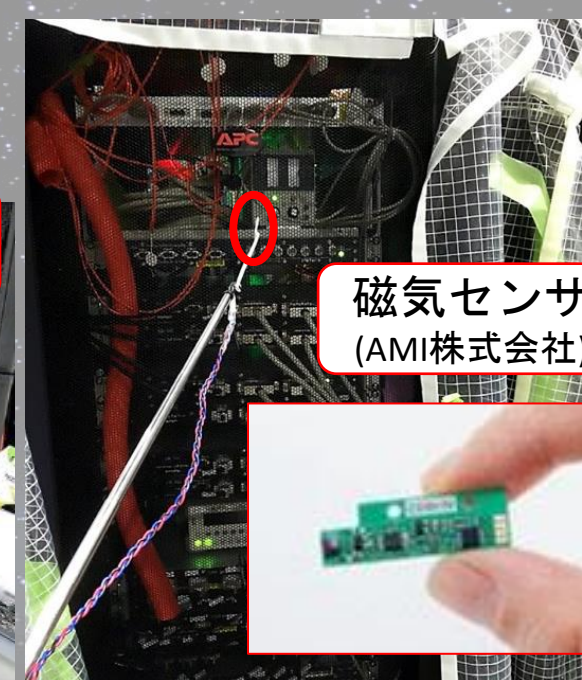
# ポータブルPEMシステム

ChromebookとUSBセンサを組み合わせ、  
坑内における作業効率を大幅に改善

- ✓コンパクトで軽量、起動が速い
- ✓電源やケーブリング等の制限なし
- ✓世の中の便利なAndroidアプリが使える



計測用USBマイク  
(miniDSP社)



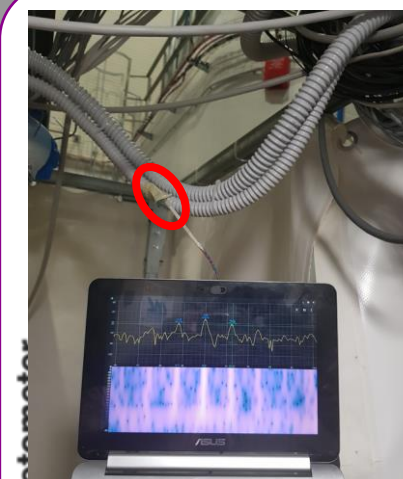
磁気センサ  
(AMI株式会社)



Real-time spectrogram  
analyzer (Android app)

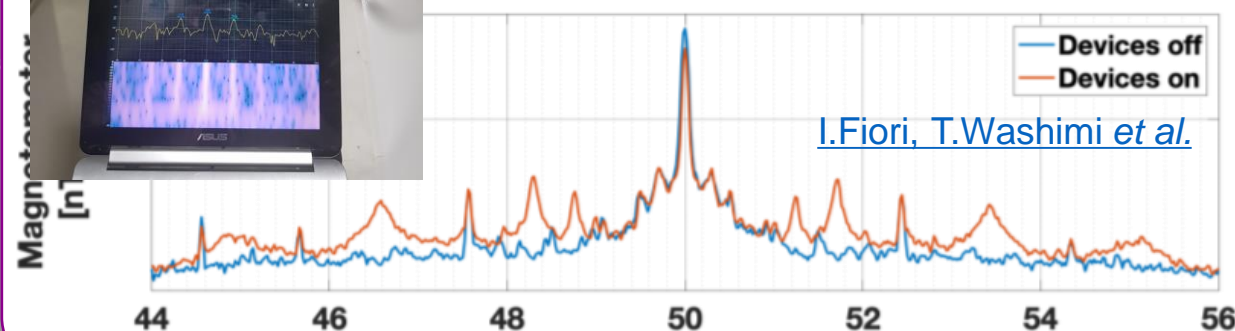
USB加速度計  
(東陽テクニカ)

ASUS Chromebook Flip C101PA



このセットをVirgoに持参してノイズ  
探索に参加した(2019年10月)

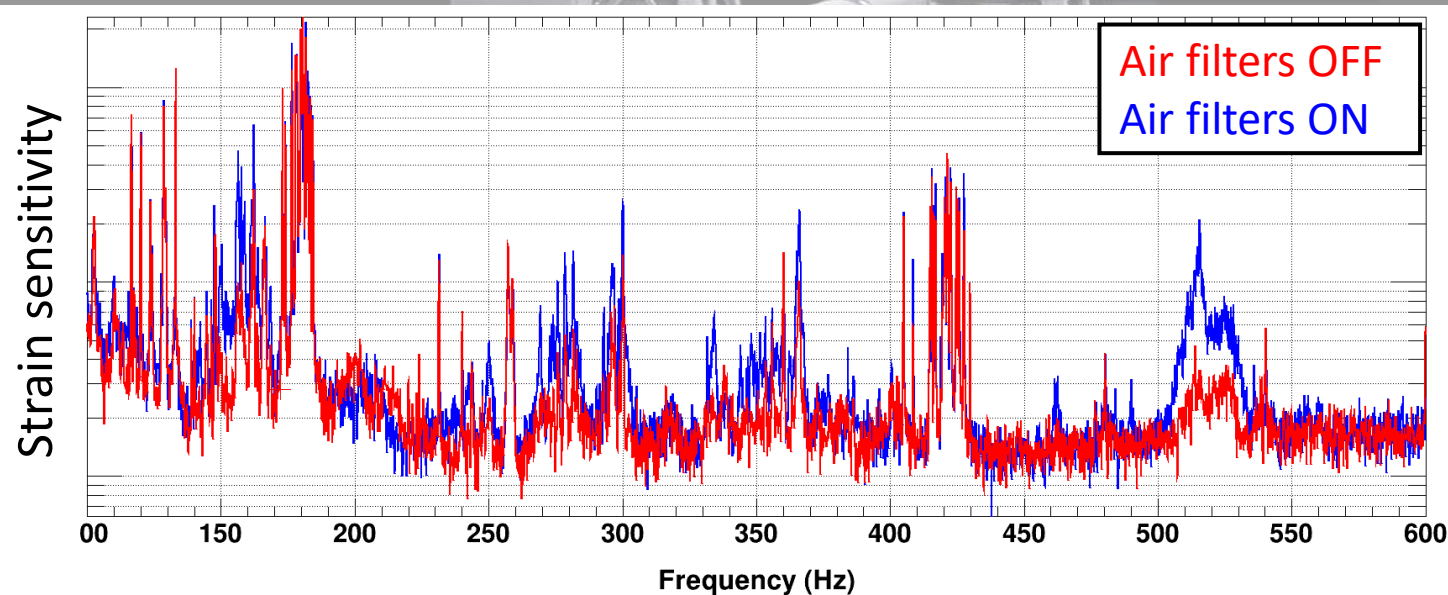
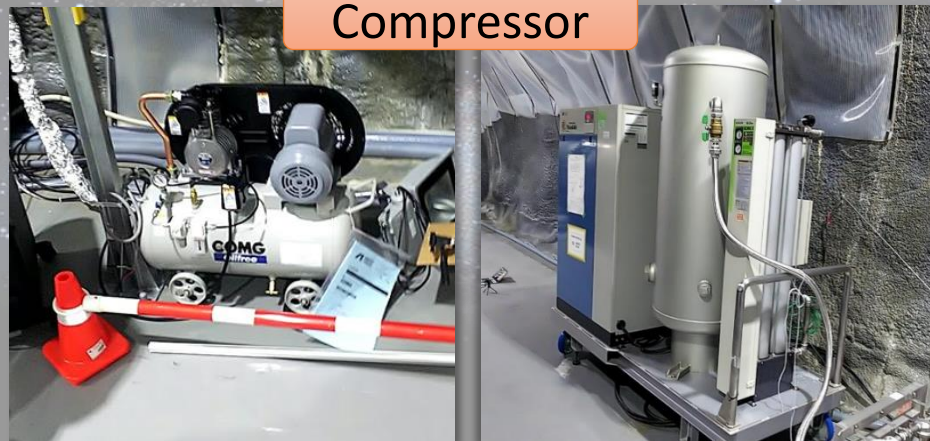
- 深刻なノイズ源の同定に成功し、  
~2Mpcの感度向上に貢献





# 実験設備由来の環境雑音の削減

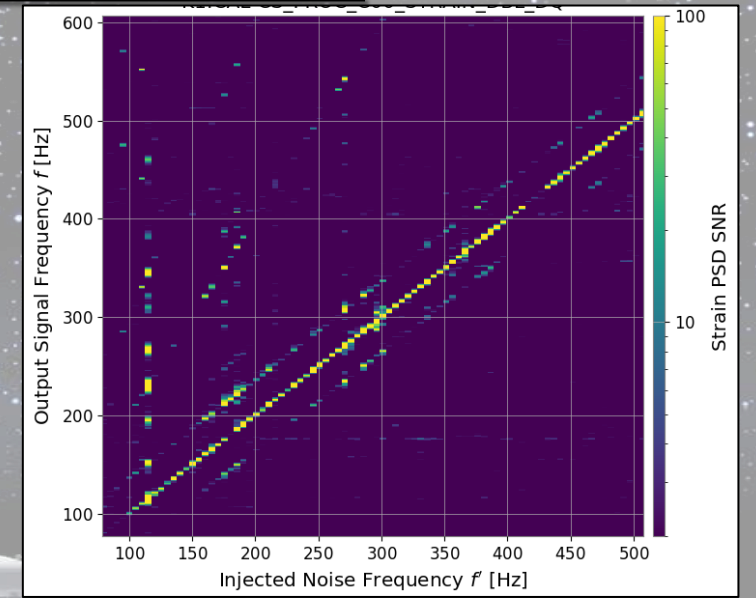
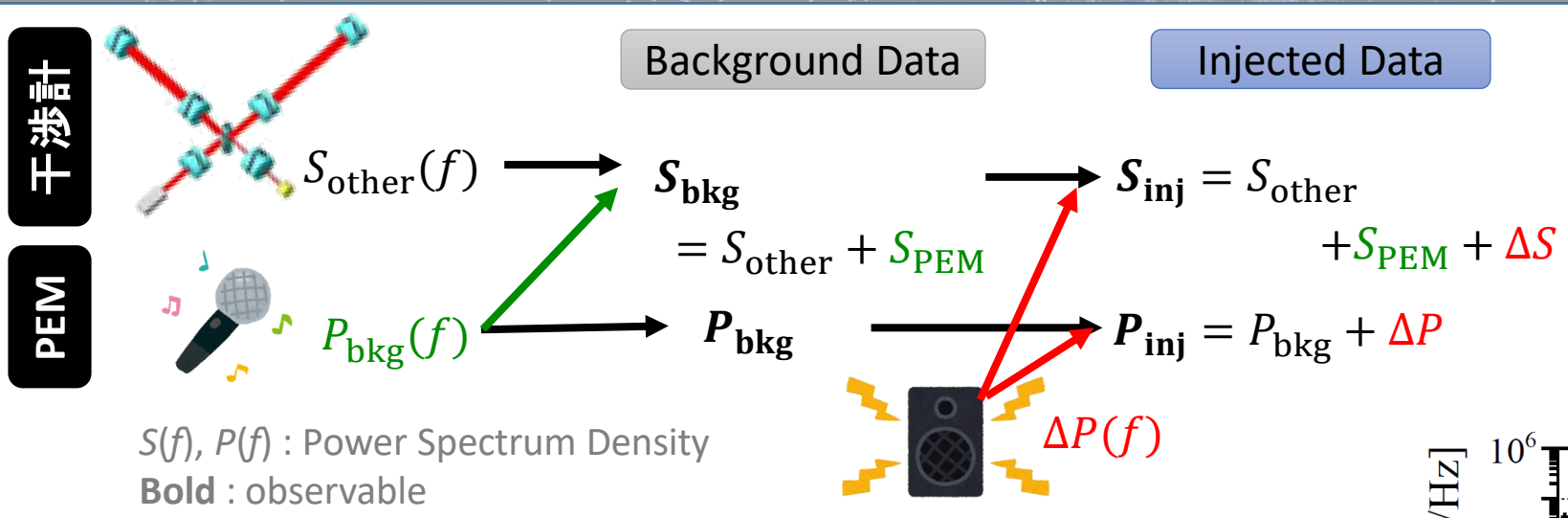
KAGRA坑内の雑音源となるあらゆる機器を、できる限りOFFに  
(室温や真空度など、検出器への影響がないように注意しながら)





# 雑音注入試験 (PEM injection) による評価

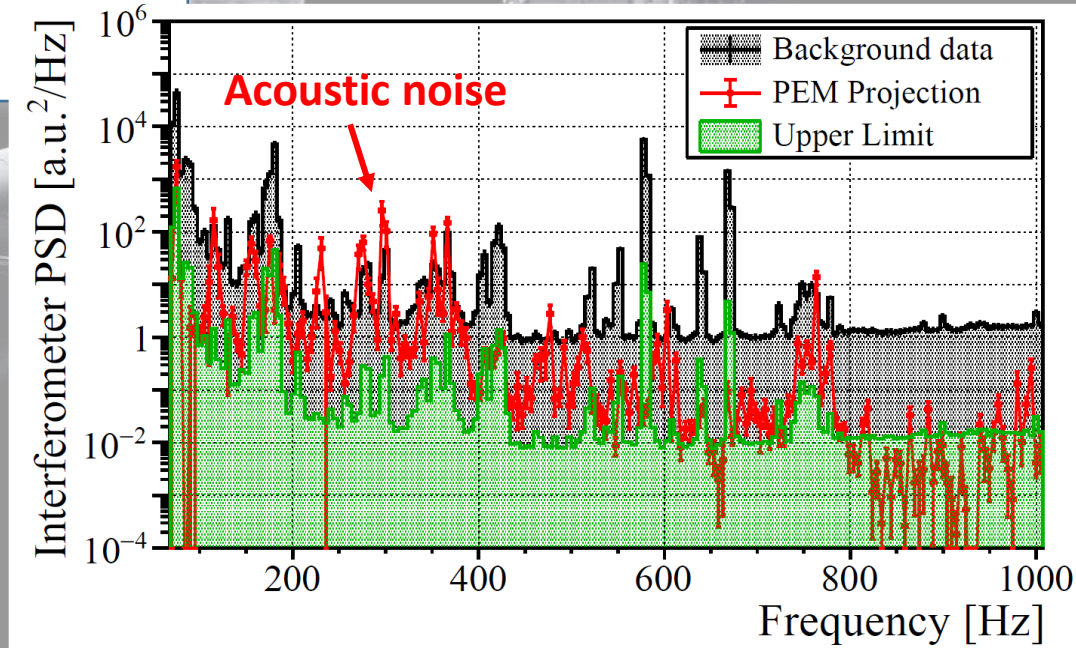
環境雑音を人工的に増加させ、干渉計信号の増え方を見ることで  
 平時の干渉計信号における環境雑音成分を算出する



周波数変化を含む“応答関数モデル”を新たに開発した  
 ✓ 中性子フラックス測定の解析手法を輸入

$$S_{\text{PEM}}(f) = \int [R(f, f') \times P(f')] df'$$

$f'$  : frequency of the PEM signal  
 $R(f, f')$  : Response function

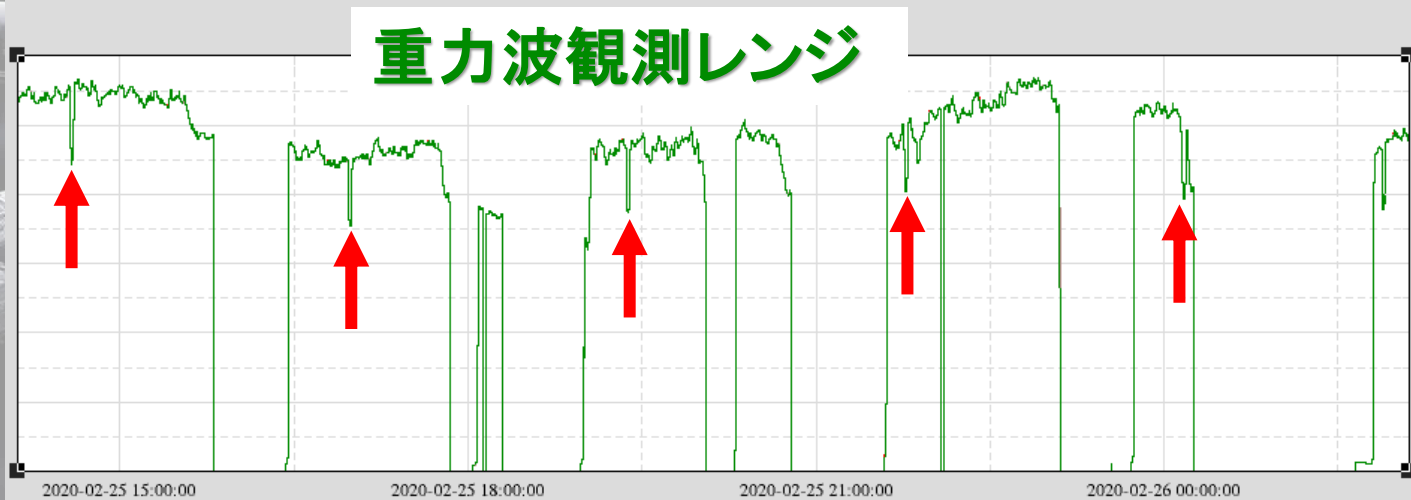
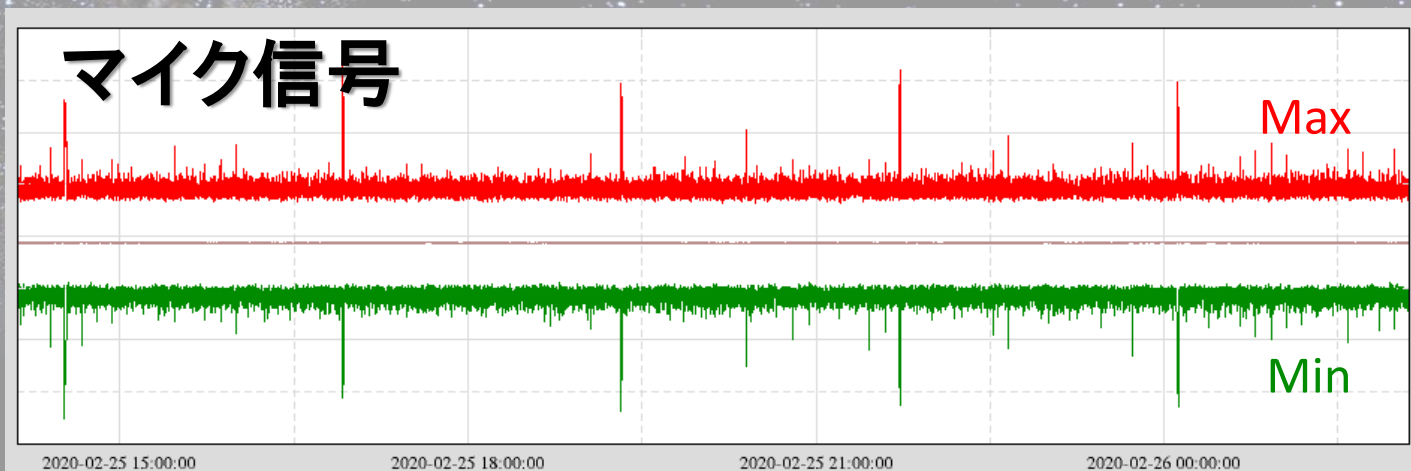
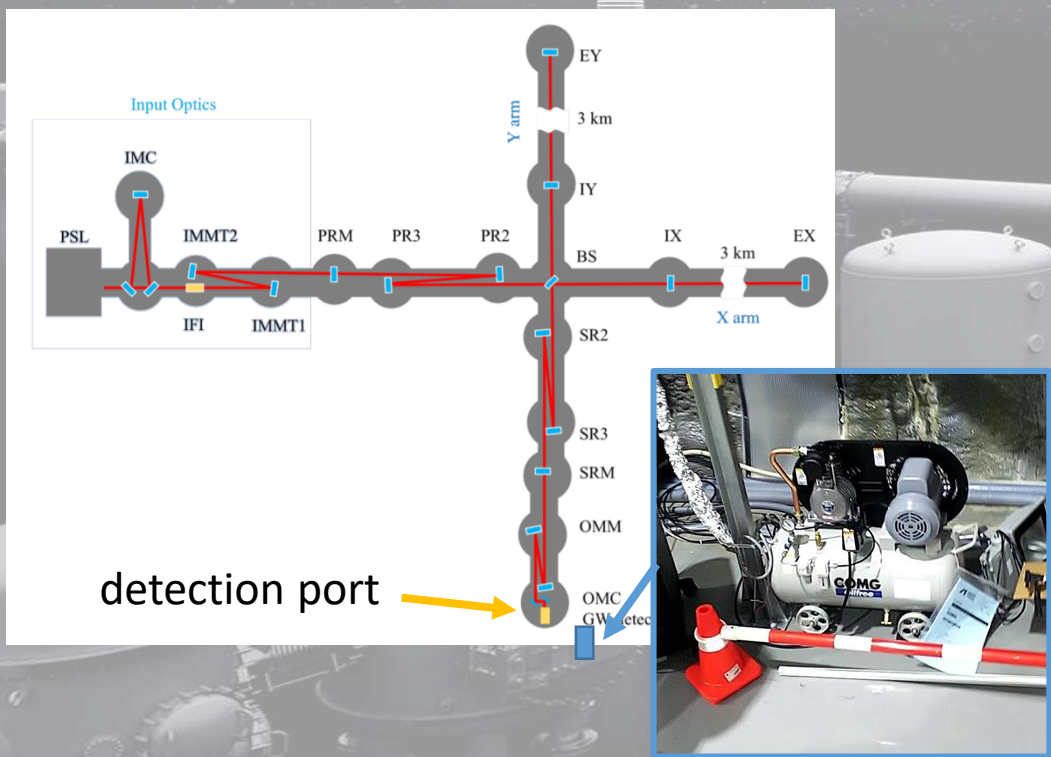




# 実験設備由来の環境雑音の例：コンプレッサ

2020年2月のKAGRA単独観測の際、重力波観測レンジが定期的に悪化する現象が見られた。

- 重力波検出ポート近くのコンプレッサによる音・振動が原因と判明
- OFFにできない機器(緊急時に真空容器を閉じるためのもの)だが、防音と防振を施すことで解決した。



3時間

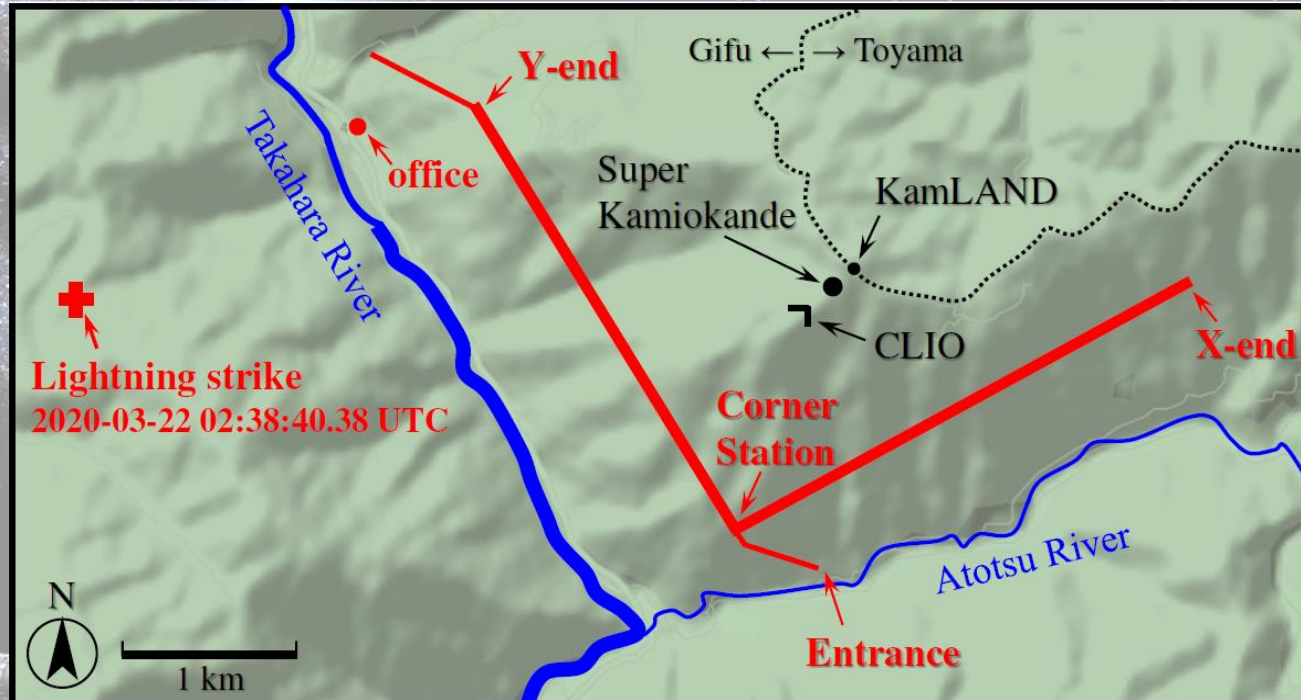
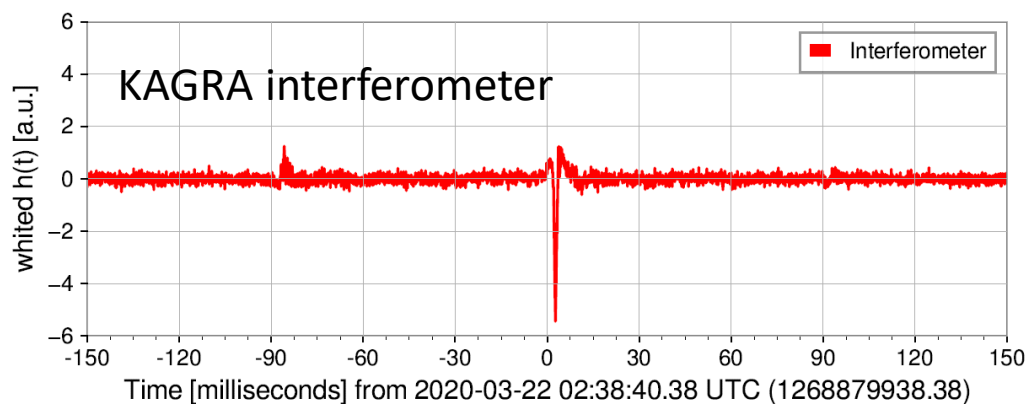
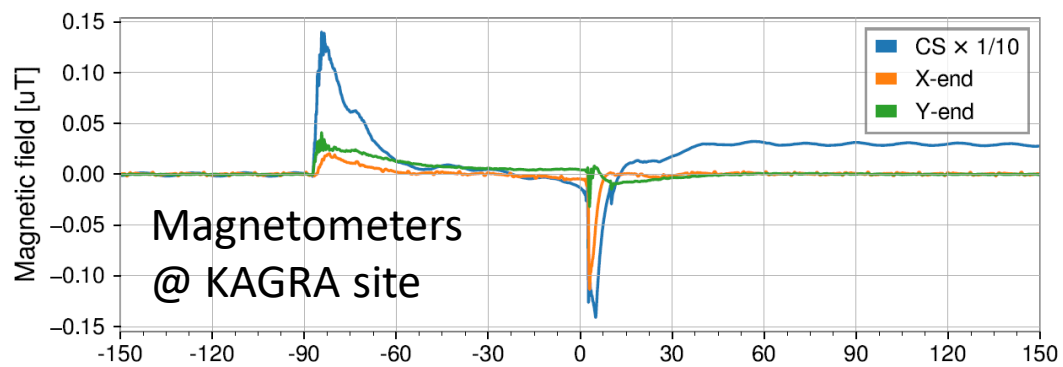


# 自然現象由来の環境雑音の例：落雷

KAGRAのすぐ近くで落雷があり、同時に干渉計にもGlitchが観測された。

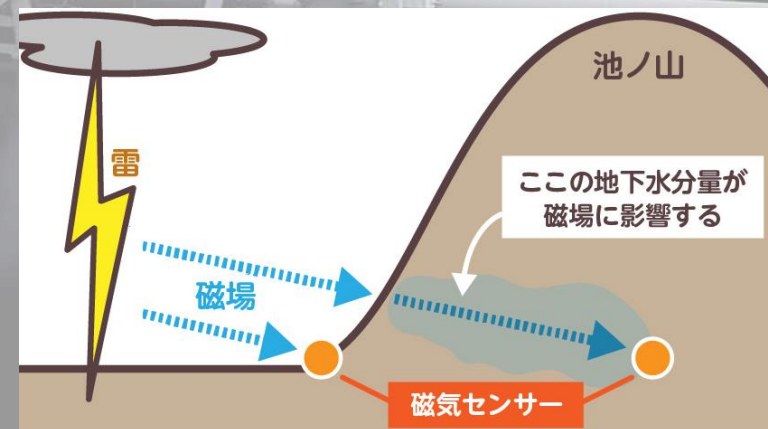
- 坑口の落雷検知器および坑内の磁力計でもしっかりとモニターされた
- 他のセンサー(加速度計など)には反応なし

[T. Washimi et al 2021 JINST 16 P07033](#)



落雷磁場を利用した  
地下水モニター手法  
を開発中

科研費  
KAKENHI



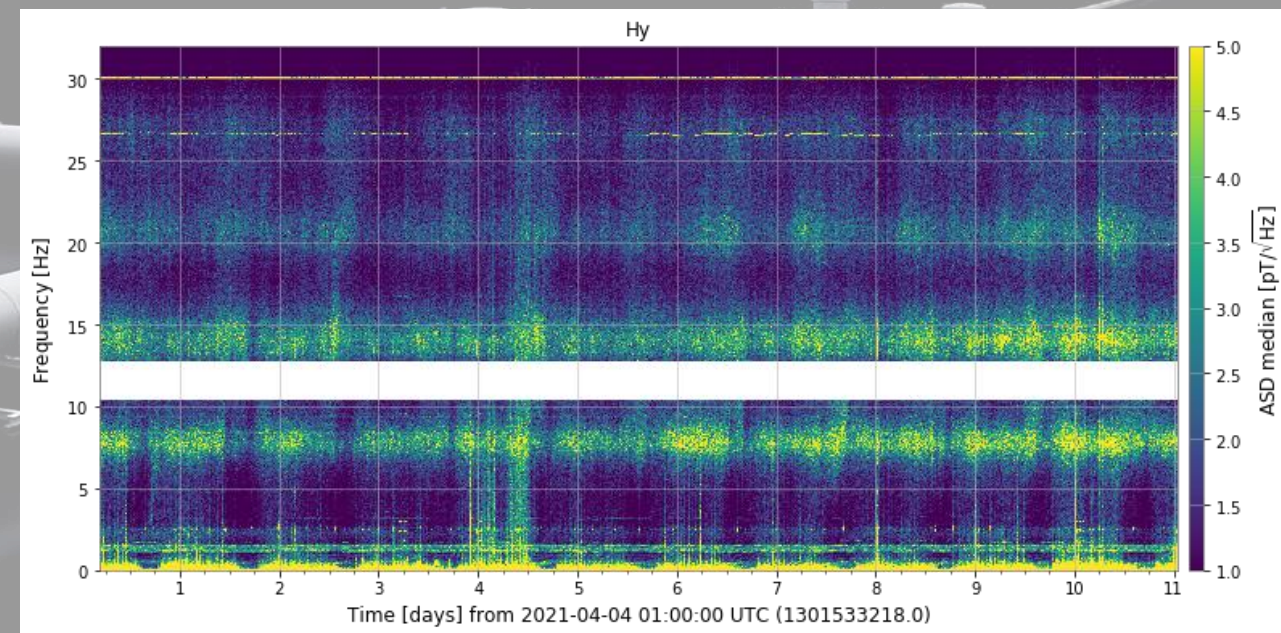
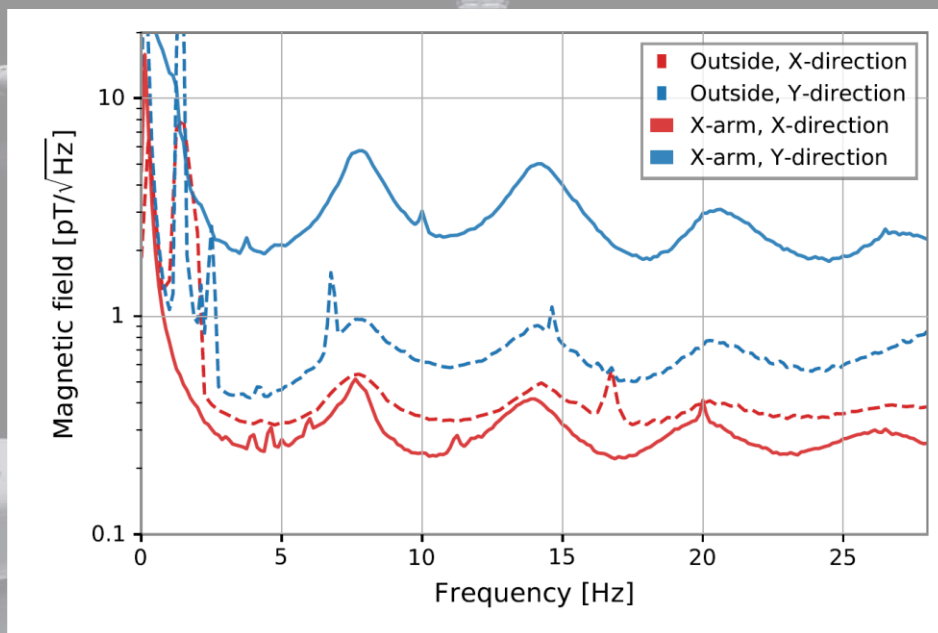
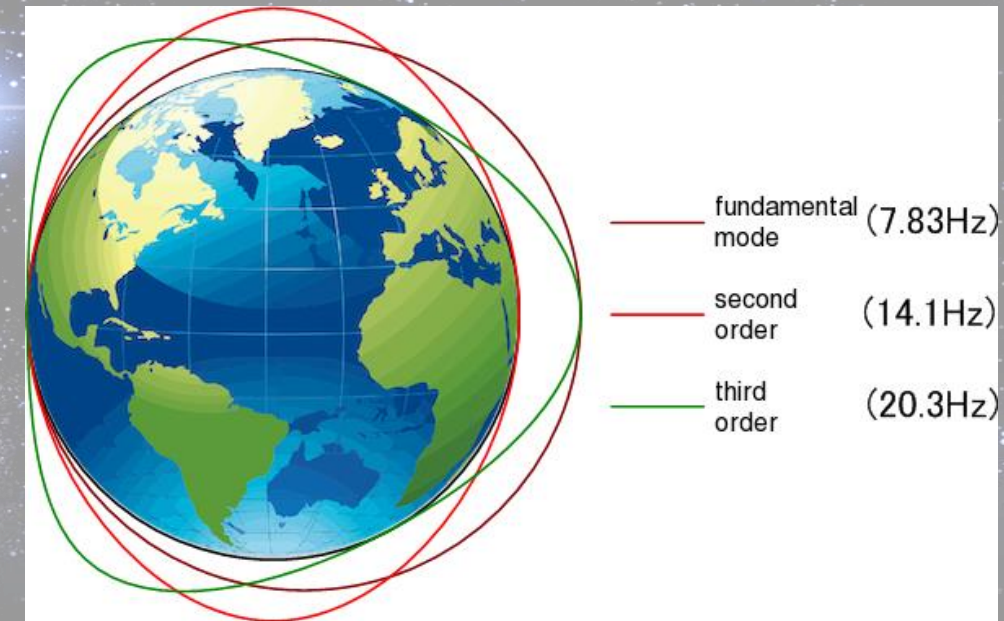
詳細は新学術の領域研究会などの発表を参照



# Schumann 共振磁場

地球の地面と電離層の間で共鳴状態となる電磁場

- 雷や太陽風などによって励起される
- 共振周波数  $f_n = 7.8 \text{ Hz}, 14.1 \text{ Hz}, 20.3 \text{ Hz}, \dots$
- 振幅  $\sim 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$
- 地球上全体で相関を持つ
- 振幅・位相・方向などが時間とともに変化する
- 離れた観測地点で相関のある信号を探索する場合、特に背景重力波探索でやっかいな雑音となりうる

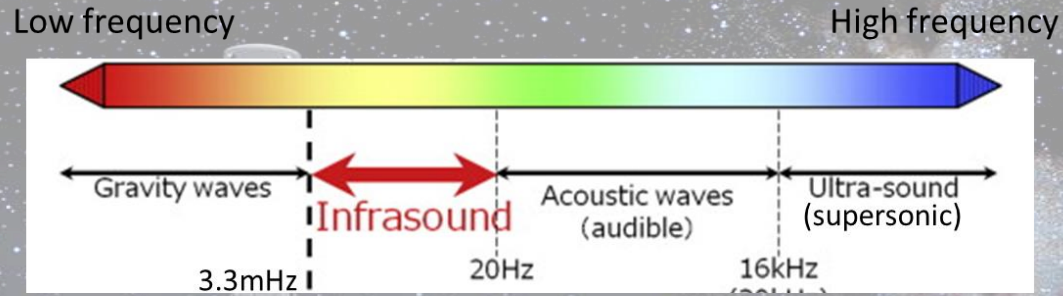


詳細はJPS 2021年秋季大会, 21pN1-6 (領域13 環境物理)を参照



# インフラサウンド

- 人間の耳の可聴域(20Hz~16kHz)よりも低い周波数の音波

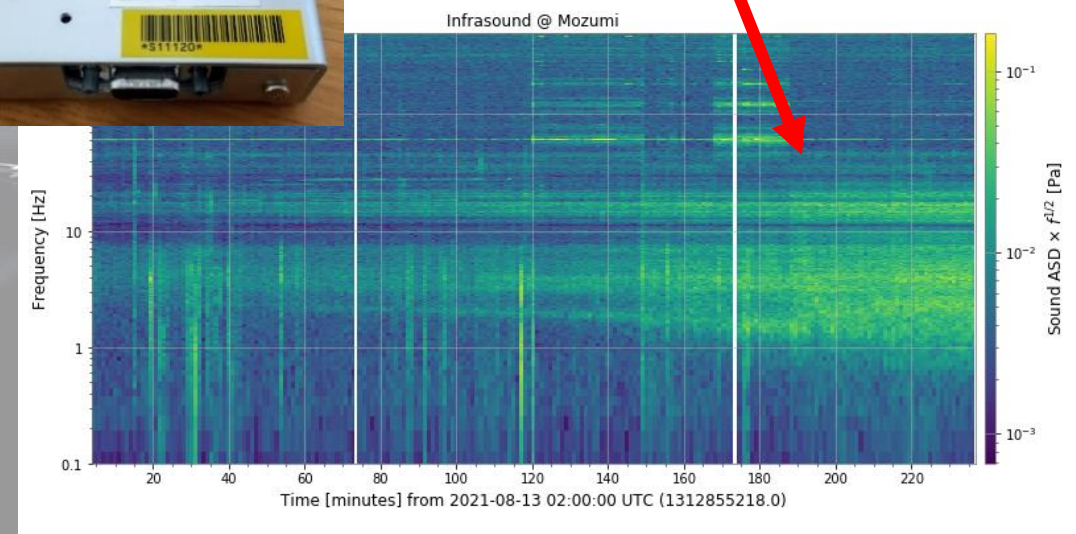


- 地震、雷、噴火、津波、雪崩、ダム、隕石、核実験などで発生
- 音波の減衰長は周波数の2乗に比例するため、低周波音は長距離を伝搬する

$$P = P_0 e^{-\alpha x}, \quad \alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left( \frac{4\eta}{3} + \frac{\kappa(\gamma - 1)}{c} \right)$$

$\eta$ : 粘性係数  $c$ : 定圧比熱  
 $\kappa$ : 熱伝導率  $\gamma$ : 比熱比

- 重力波観測への影響
  - Suspensionを揺らす。基線長伸縮を起こす
  - 散乱光雑音としてup-conversionして寄与
  - Newtonian noise (in-room, atmospheric)となる

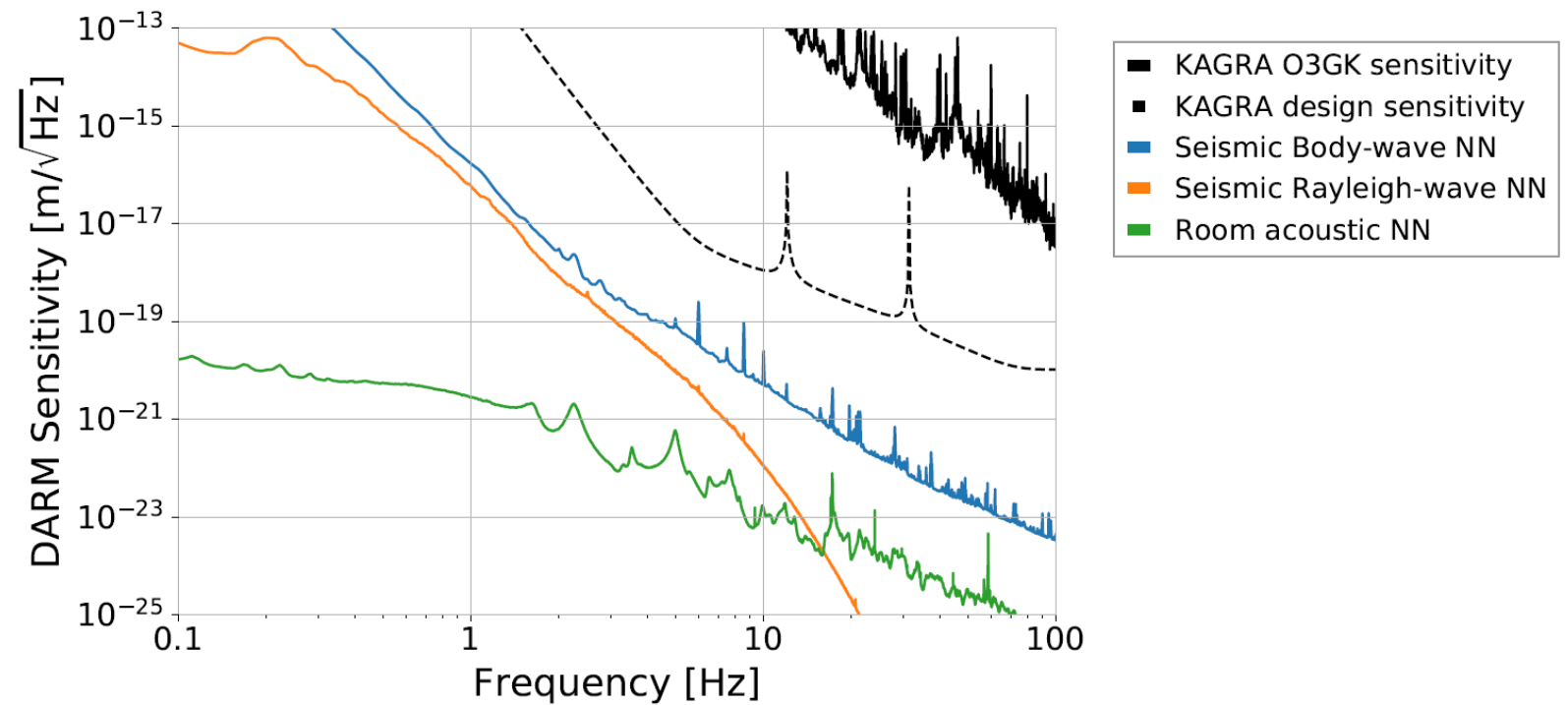
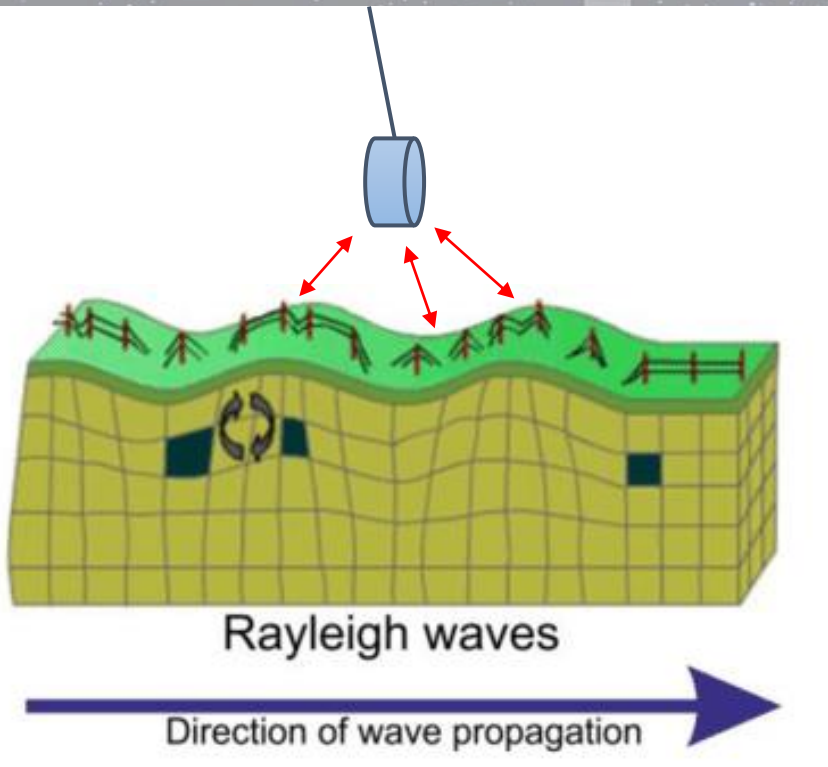




# Seismic Newtonian noise

- 干渉計周辺の物質の運動の影響が、万有引力を通じてノイズとなる
- 現行の重力波検出器(LIGO, Virgo, KAGRA)の設計感度より十分小さいと見積もられているが、将来の検出器(Einstein Telescope, Cosmic Explorer)では重要なノイズになると予想される
- 地下施設を使用することのメリットの評価として、KAGRAで研究を行っている

[F. Badaracco, T. Washimi et. al., Phys. Rev. D 104, 042006 \(2021\)](#)



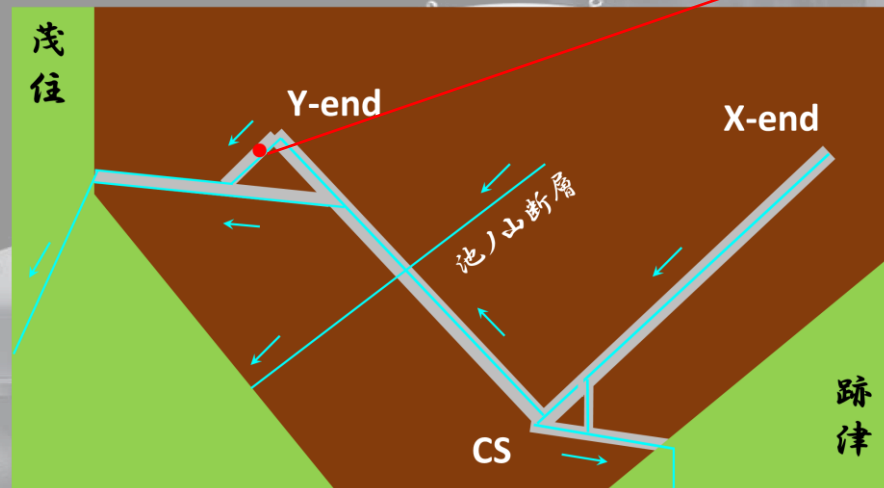
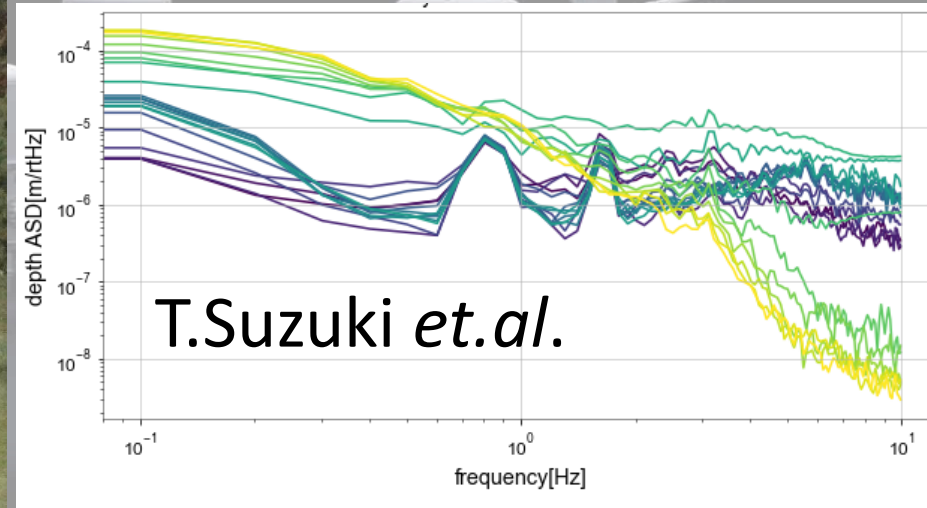
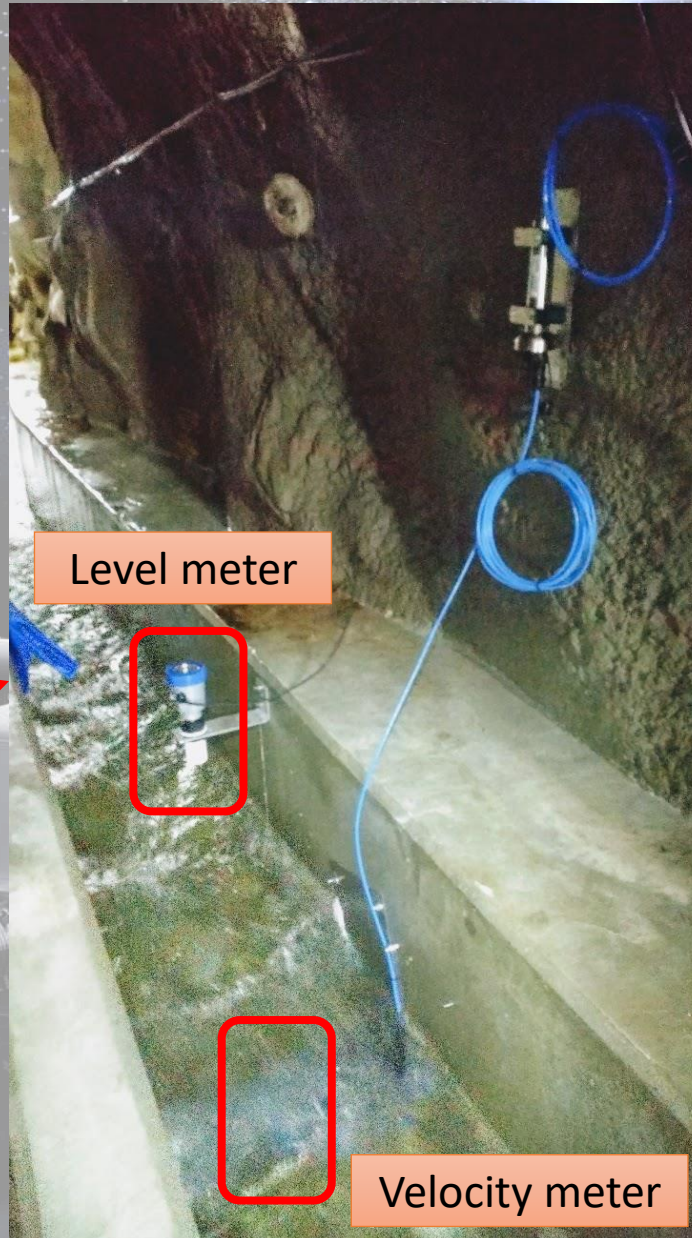


# Water fluid monitor & Newtonian noise simulation

Water fluid in the drainpipes can cause Newtonian noise. So we are working on

- Monitoring the water fluid @ Y-end
- NN estimation with water simulation

If we conclude this noise possibly affects the KAGRA design sensitivity and/or will be observed in O4 data, we need to mitigate this noise before O5 starts.



詳細は次の鈴木講演にて



# Summary

- ✓ KAGRAは神岡地下の重力波検出器
  - もうひとつの「地下宇宙」
- ✓ 重力波観測において環境雑音対策は重要
- ✓ KAGRAでは様々な環境雑音の研究を行っている
  - たくさん論文を書ける (この1年で5本publish)

1. KAGRA Collaboration, PTEP-03 (CAL, DET, PEM, and GIF), **05A102**
2. T. Washimi *et.al.*, *Class. Quantum Grav.* **38** 125005 (2021)
3. T. Washimi *et.al.*, *JINST* **16** P07033 (2021)
4. F. Badaracco *et.al.*, *Phys. Rev. D* **104**, 042006 (2021)
5. A. Longo *et.al.*, *Pure Appl. Geophys.* (2021)