

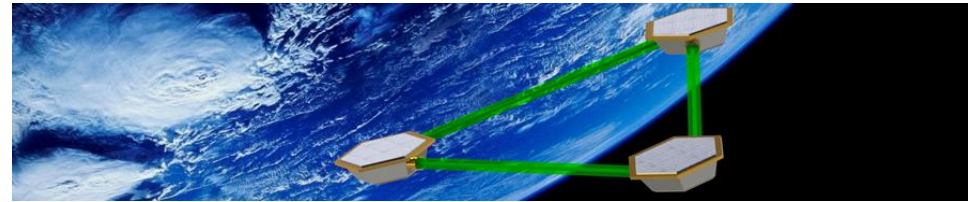
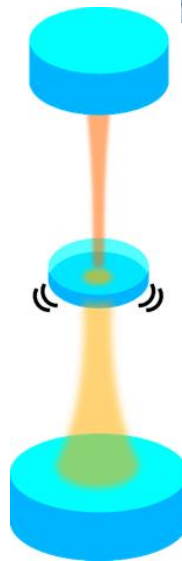
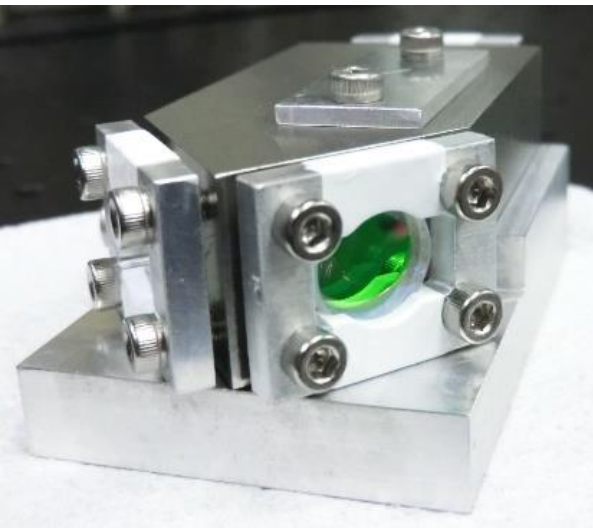
重力波天文学・物理学の 現状と未来

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

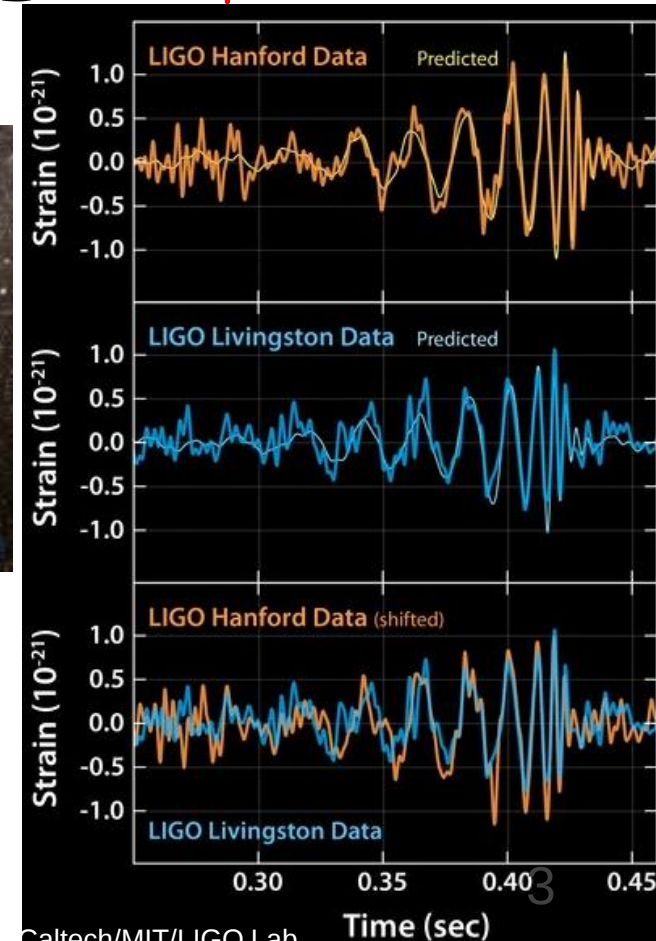
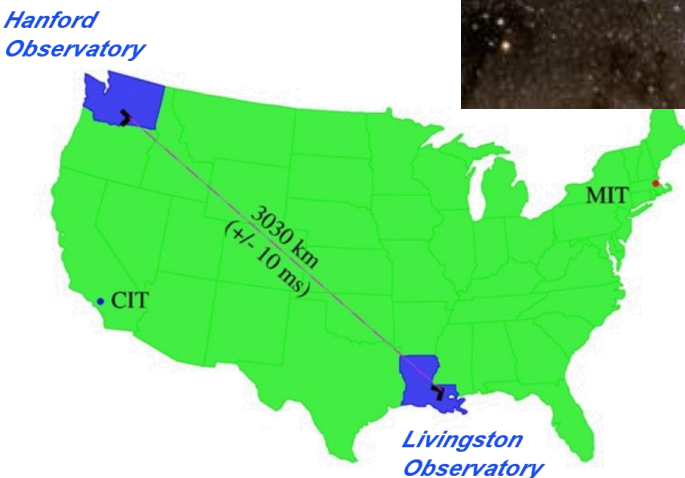
自己紹介

- 道村唯太 (みちむら ゆうた)
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 助教
- 1987年生まれ 神奈川県 横浜市 出身
- 2015年に東京大学で博士(理学)取得
指導教員は坪野公夫先生・安東正樹先生
松本先生の1つ下
- 重力・相対論実験



重力波の初検出

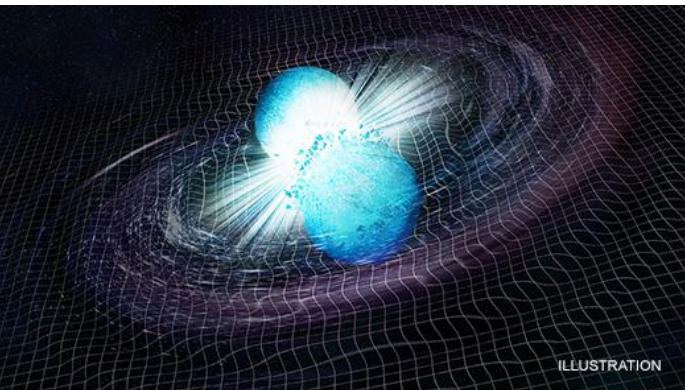
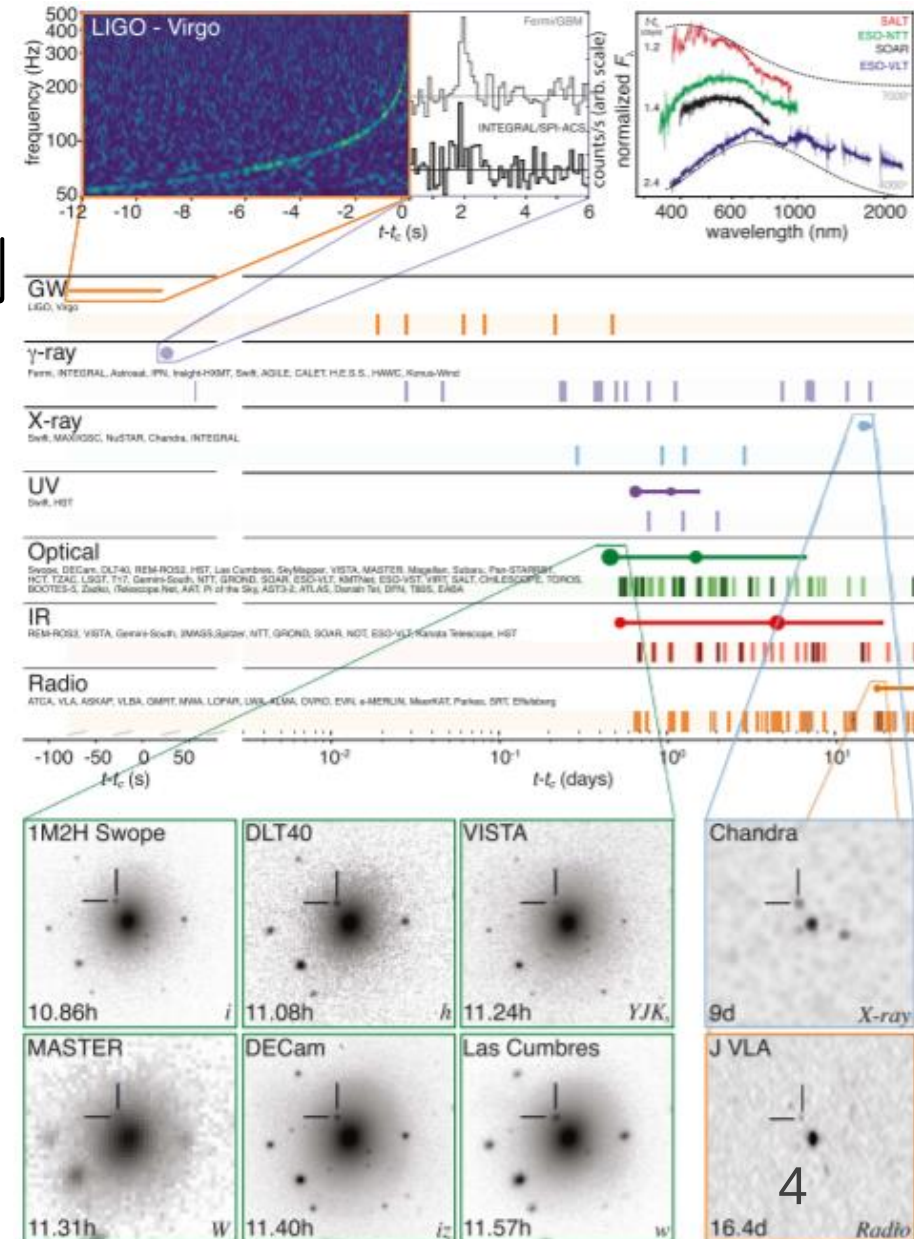
- 2015年9月14日にアメリカの2台のLIGOで同時検出
 - **ブラックホール連星**の合体からの重力波
- アインシュタインによる予言から**100年**
- 宇宙を見る**新しい手段**



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

連星中性子星合体からの重力波

- 2017年8月17日に初検出
- ほぼ同時に
ガンマ線バーストを観測
その後も様々な
電磁波の波長や
ニュートリノで観測
- マルチメッセンジャー
天文学の幕開け





2017年 ノーベル物理学賞

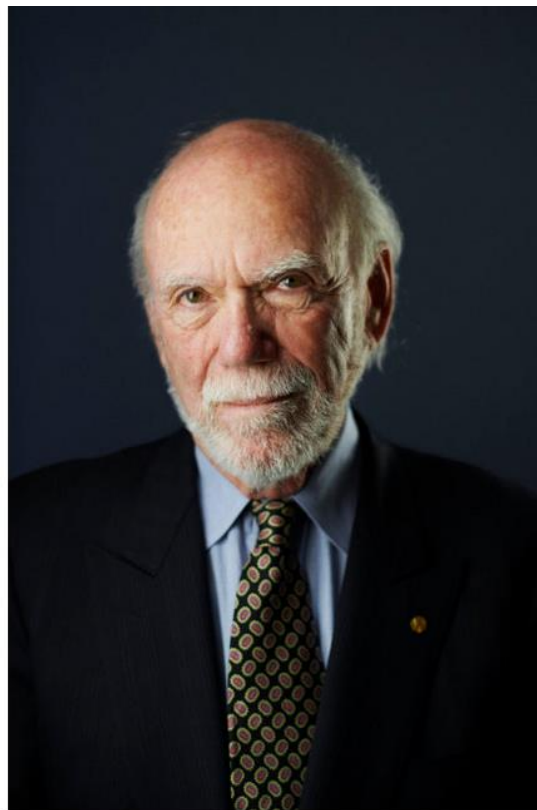
- LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Rainer Weiss

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Barry C. Barish

Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

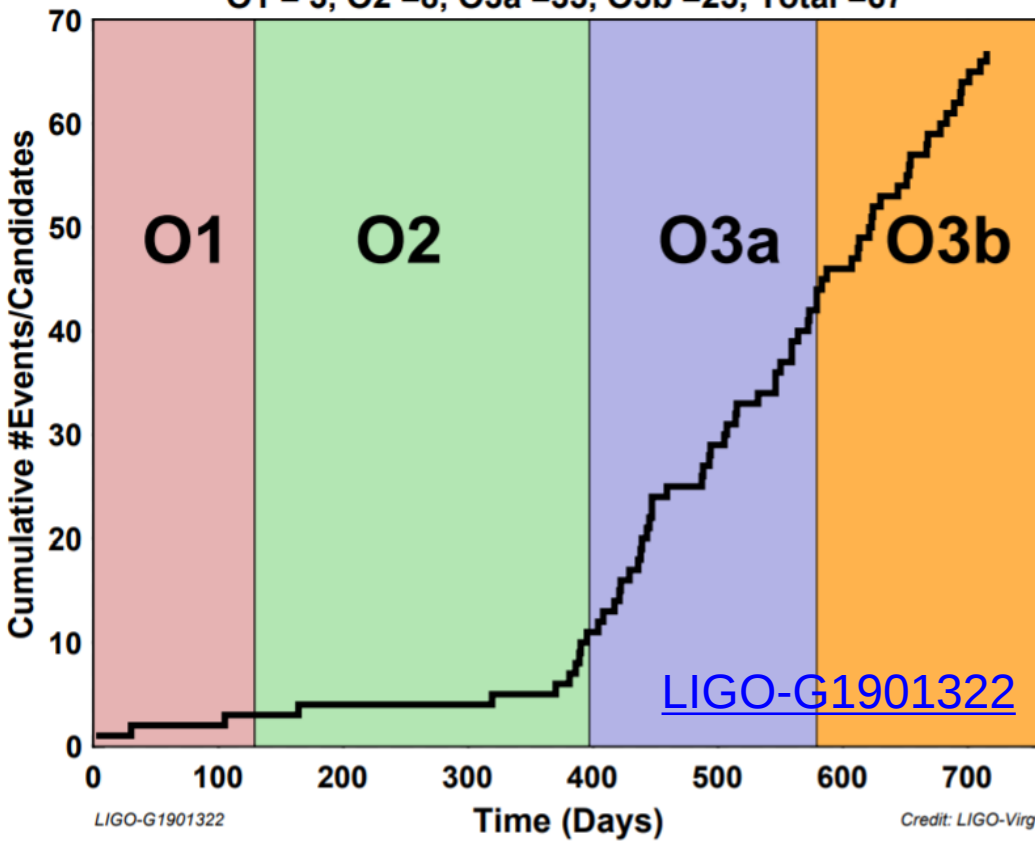
Kip S. Thorne

Prize share: 1/4

その後も続々と重力波を検出

- 2019-2020の最新の観測(O3)では毎週のように重力波の検出が報告(情報は1分以内に公開)
- iPhoneに通知が来るアプリも登場

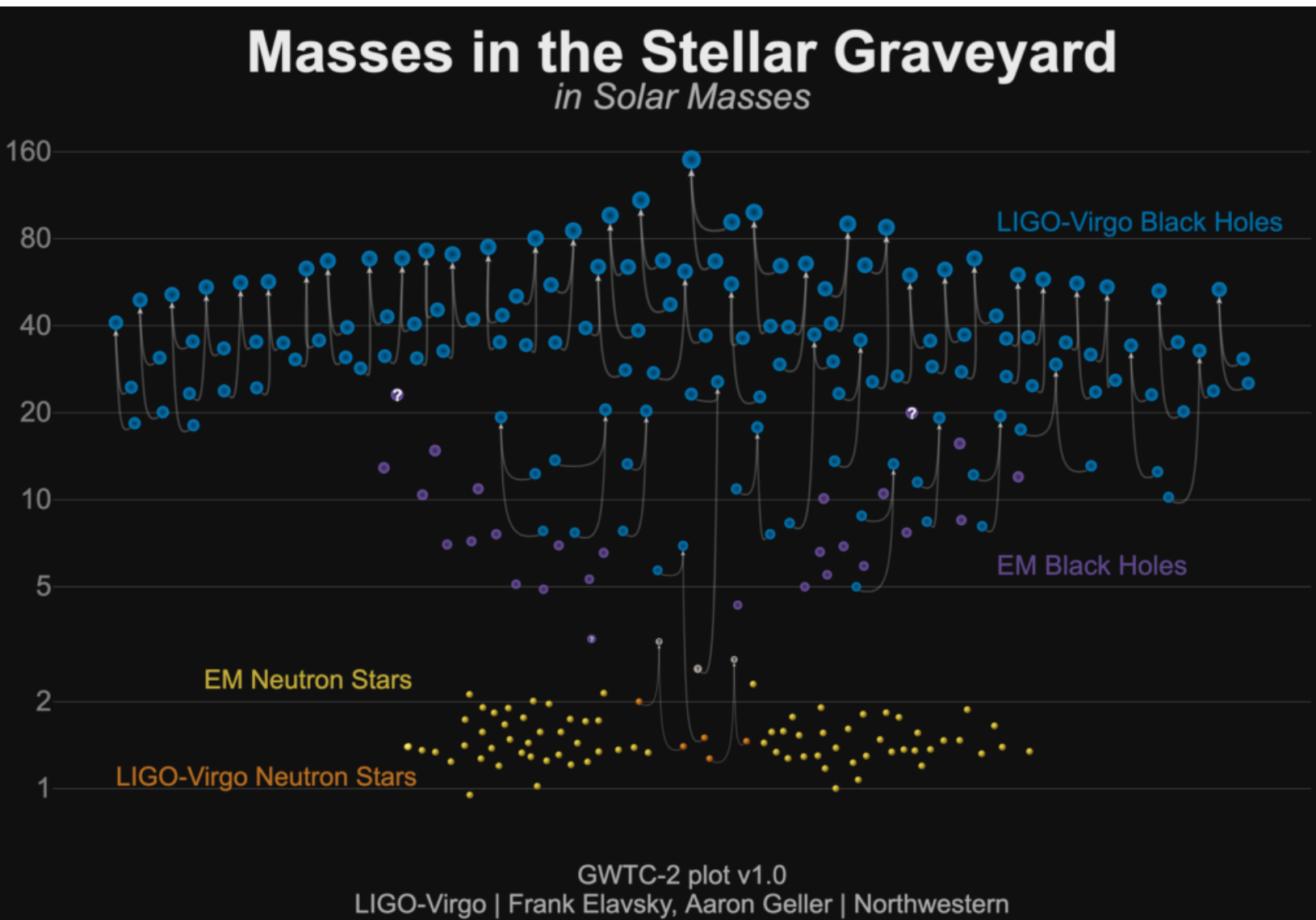
Cumulative Count of Events and (non-retracted) Alerts
O1 = 3, O2 =8, O3a =33, O3b =23, Total =67



<https://apps.apple.com/jp/app/gravitational-wave-events/id1441897107>

これまで見つかっている重力波

- 現在までに**50個**の検出が報告されている



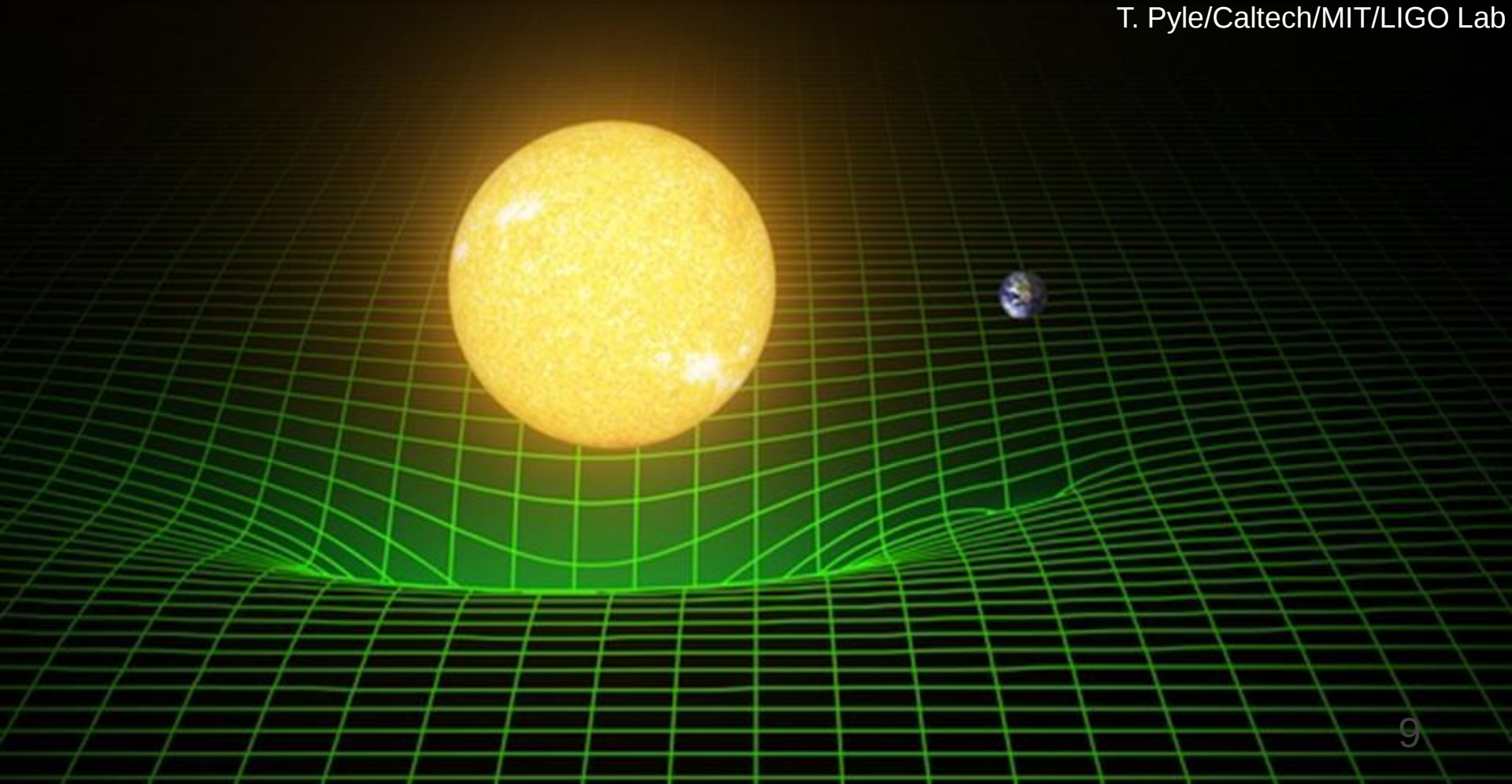
今回のお話

- 重力波とは？
 - 一般相対性理論と重力波
 - 重力波を出す天体現象
 - 重力波天文学の現状とこれから
- 重力波検出の原理
 - レーザー干渉計型重力波検出器
 - 重力波観測ネットワーク
 - 検出器の感度と原理雑音
- 大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)
 - KAGRAの現状と観測計画

一般相対性理論における重力

- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab



一般相対性理論における重力

- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

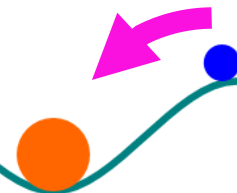
なにもないトランポリンは平ら



ボールを置くと
トランポリンが歪む



近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる

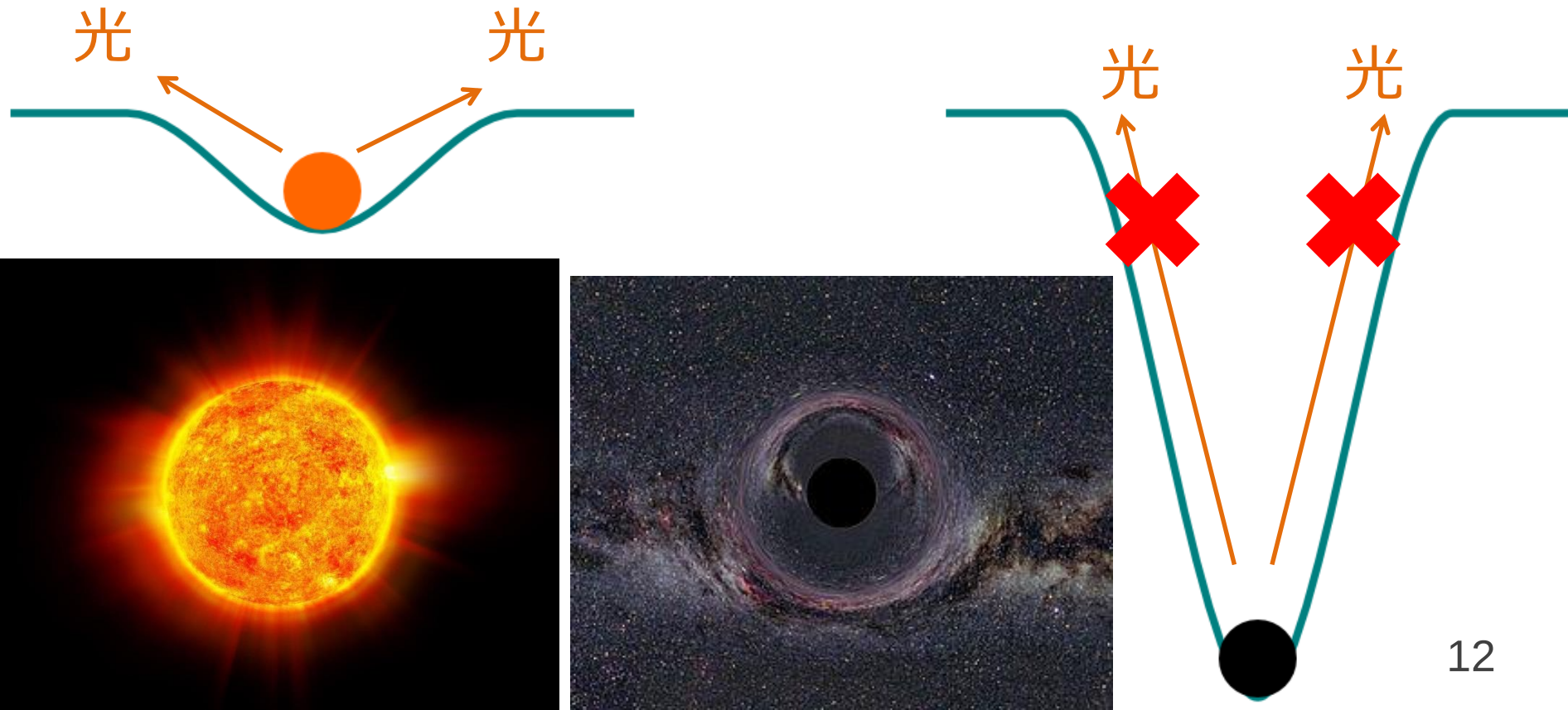


一般相対性理論における重力



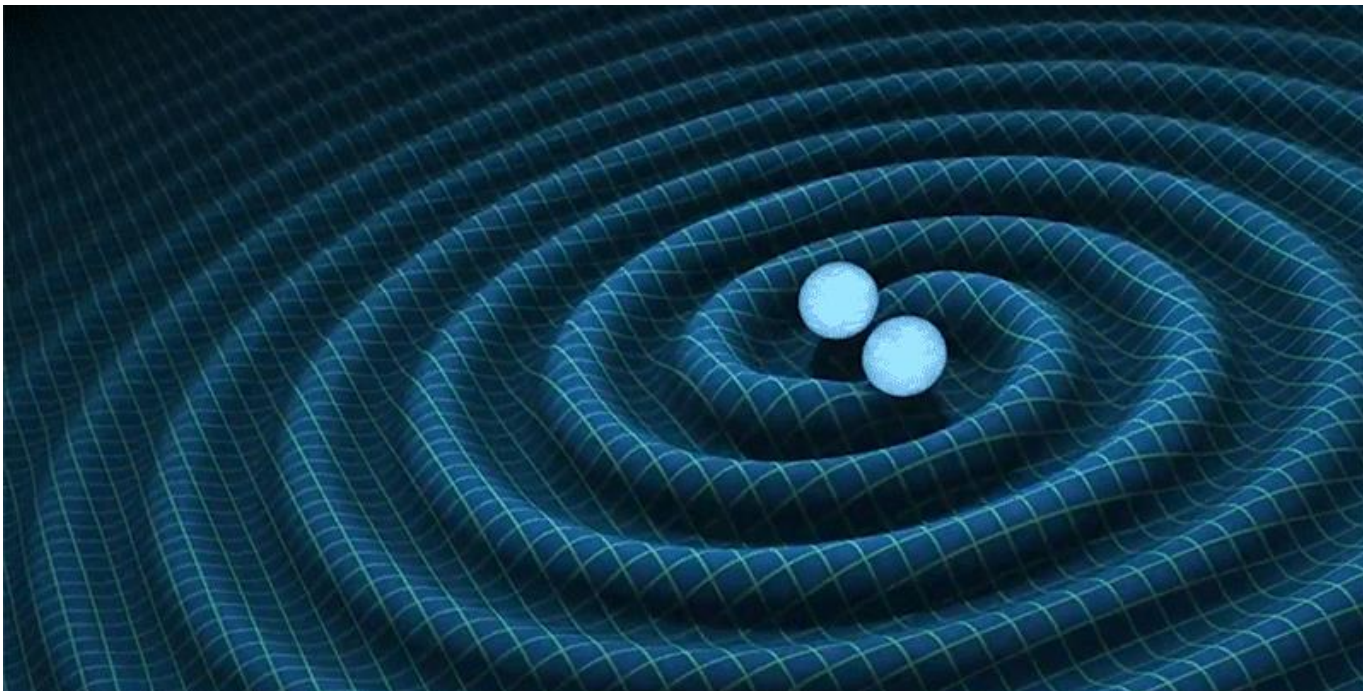
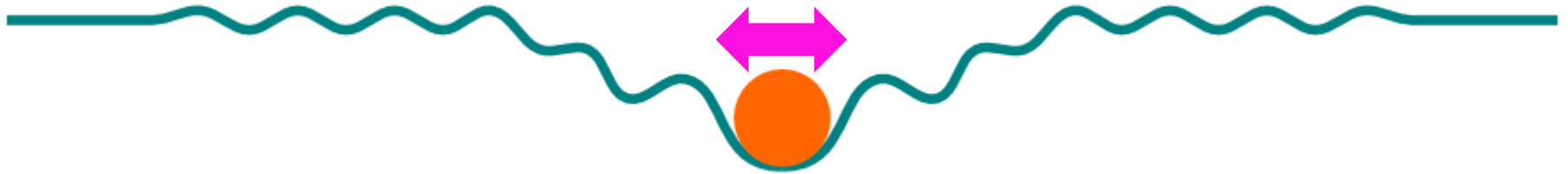
ブラックホール

- 極端に小さく重い天体
- 空間が歪みすぎて光も何も脱出できない
光で見ることができない天体



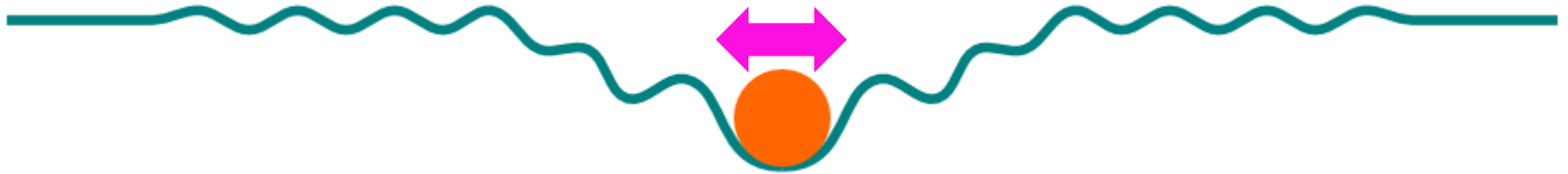
重力波は「時空のさざ波」

- 物体が動くと空間の歪みが変化し、光の速さで伝搬する → これが重力波



重力波は「時空のさざ波」

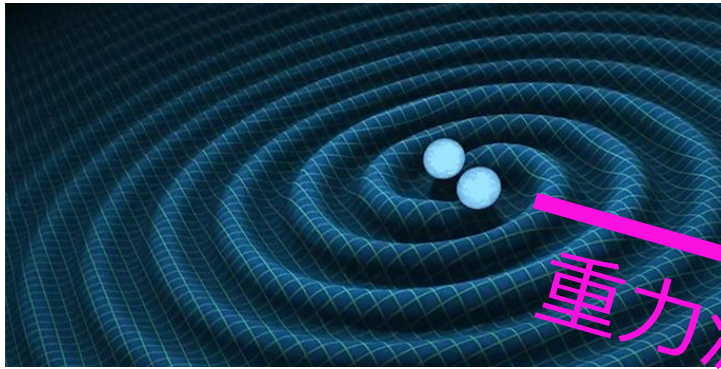
- 物体が動くと空間の歪みが変化し、光の速さで伝搬する → これが重力波



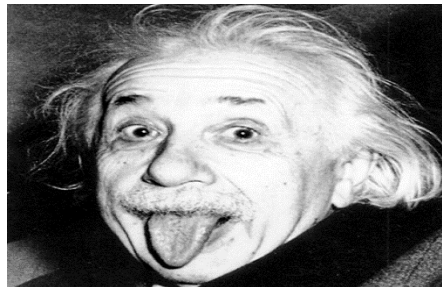
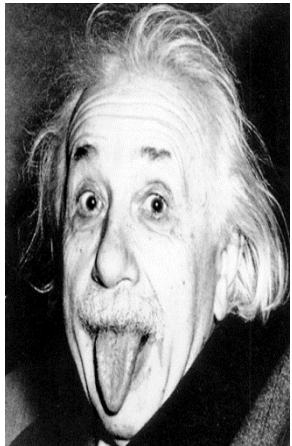
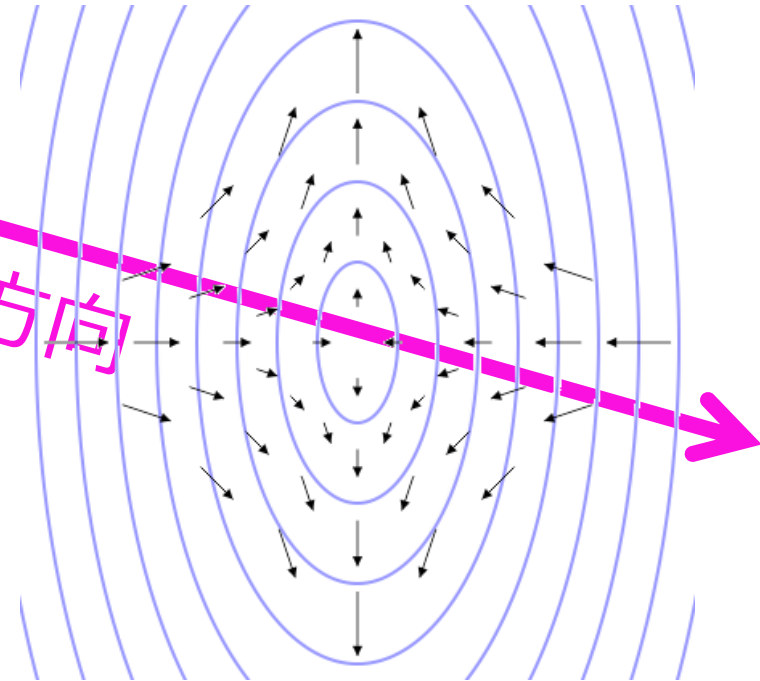
水の波紋
に似ている

重力波の特徴

- 縦方向が伸びると、横方向が縮む
- 何にも遮られない (透過性が高い)



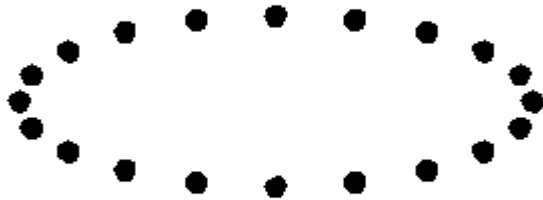
重力波の伝わる方向



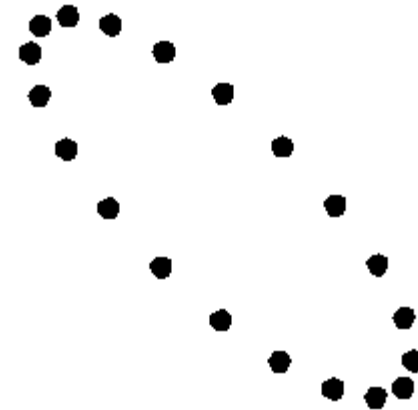
重力波の特徴まとめ

- 質量を持つ物体の運動で生じる
- 光速で伝播する
- 透過性が高い
- 2つの偏波が存在する

+モード



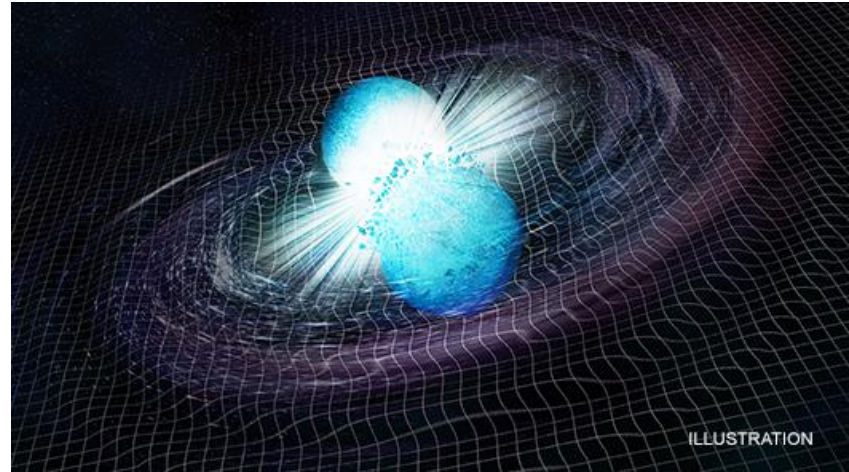
×モード



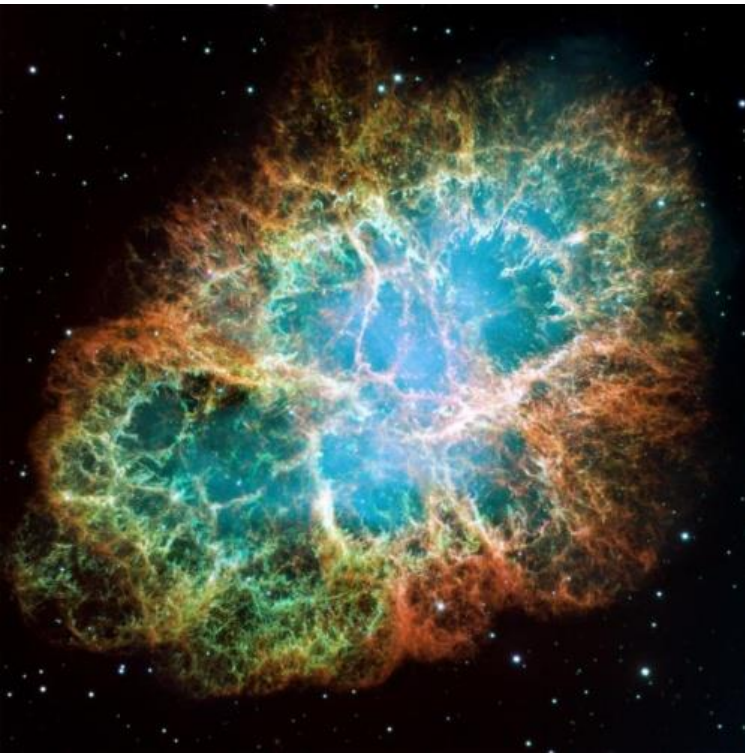
重力波源となり得る天体現象

- とても重く、
とても速く動く天体

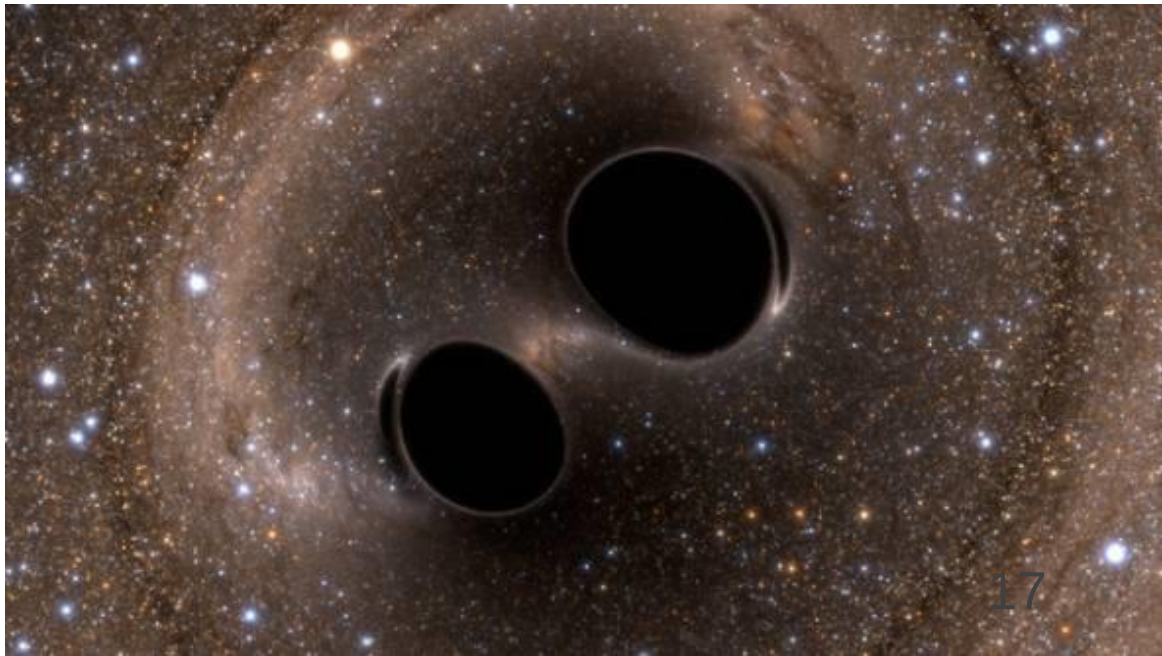
中性子星連星



超新星爆発



ブラックホール連星



重力波で何がわかる？

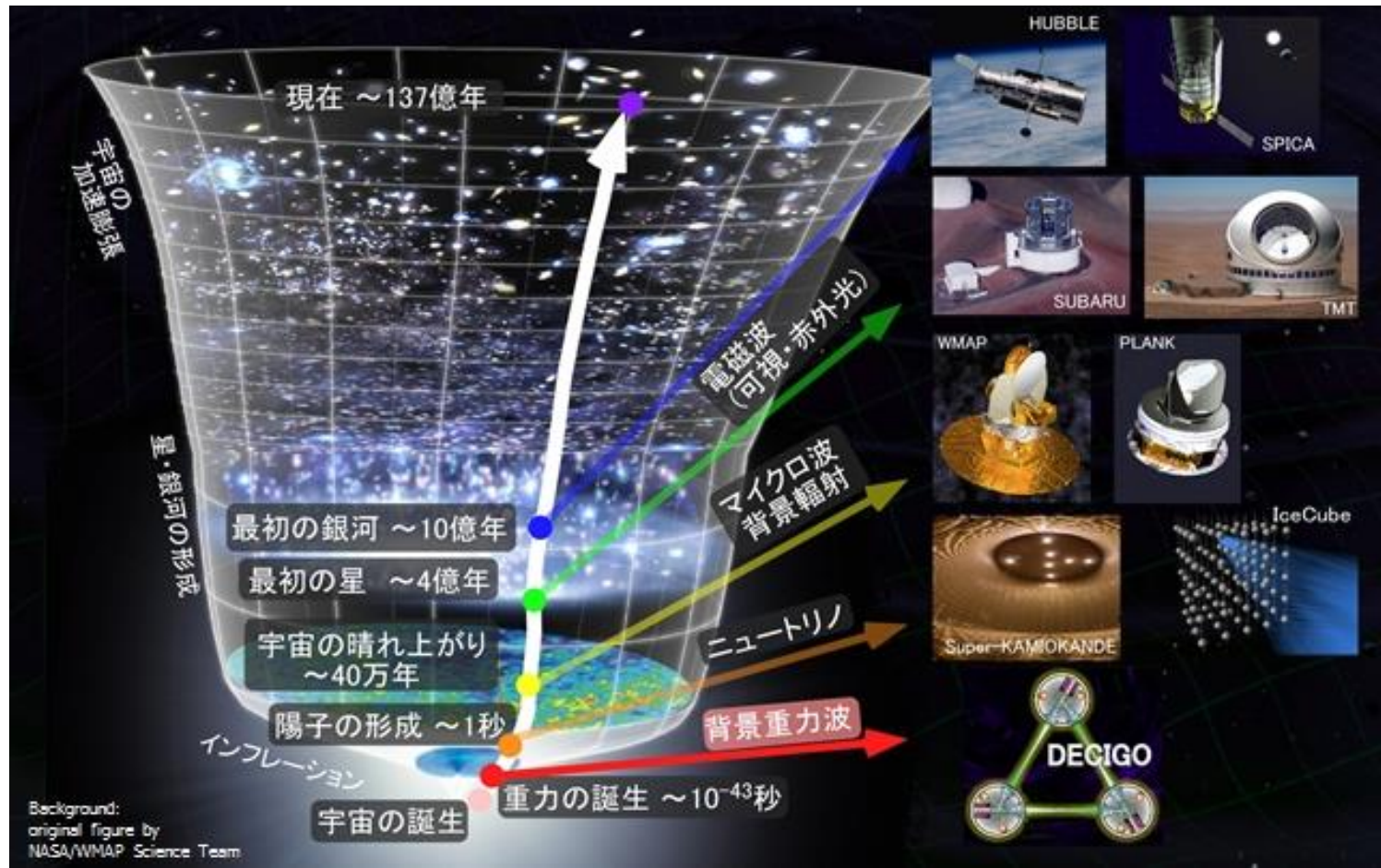
- **星の中**を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

エコー写真(音波)でお腹
の中が見えるように



背景重力波

- たくさんの天体の集まり
- 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

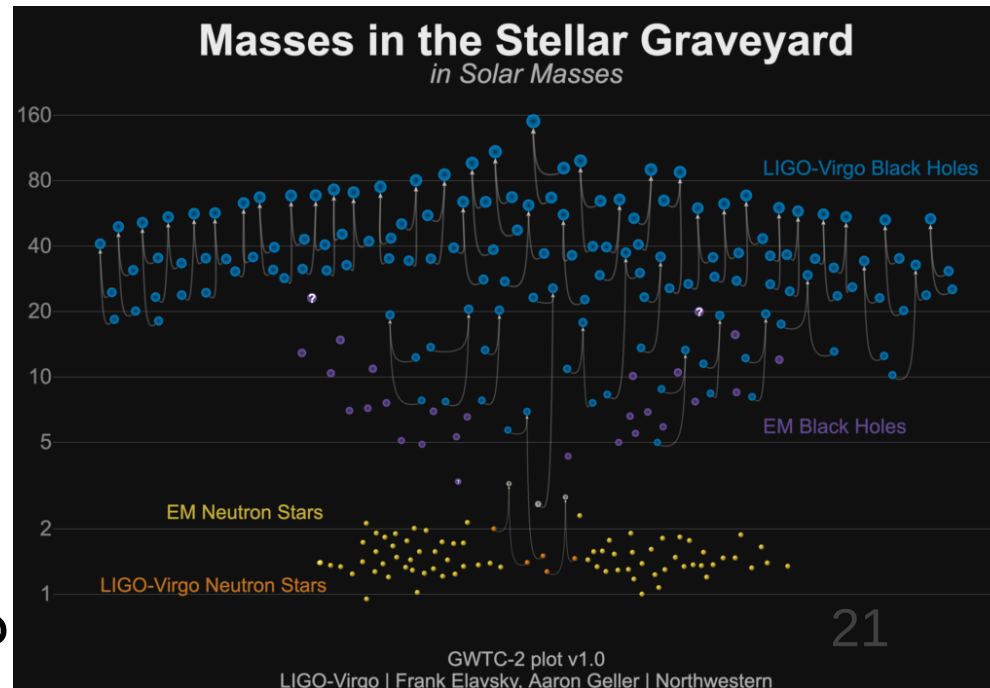


見つかっている重力波

- ブラックホール連星の合体
2015年9月14日に初検出
これまでにたくさん見つかっている
最大で合計質量150太陽質量まで
- 中性子星連星の合体
2017年8月17日に初検出
これまでに2例報告されている
- 中性子星・ブラックホール連星の合体
2019年4月26日に初検出(?)
詳細はまだわかっていない
- 超新星爆発やパルサーからの重力波、
宇宙初期からの原始背景重力波は未検出

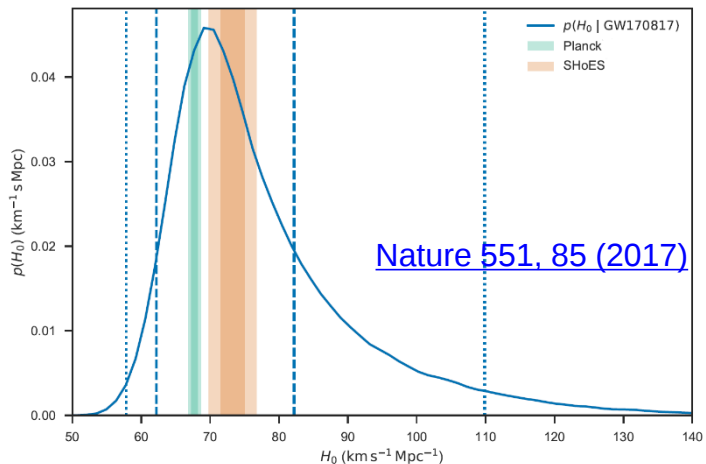
わかってきたこと、わからないこと

- **重たい**恒星質量ブラックホールがたくさんある
どこから来たのか？
中間質量ブラックホールは存在するか？
超大質量ブラックホールの起源は？
- ブラックホールと中性子星の**中間**はどうなっているのか？
- 中性子星の
潮汐変形率や
半径に制限
状態方程式は？
- 連星中性子星合体
が**重元素合成**の現場
全てを説明できる？

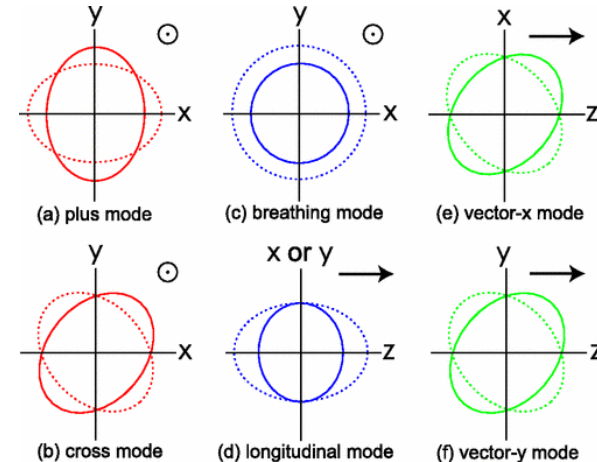


わかってきたこと、わからないこと

- 宇宙の膨張率であるハッブル定数が測定された宇宙マイクロ波背景放射からの値と超新星爆発からの値の不一致を説明できるか？



[PRD 79, 082002 \(2009\)](#)



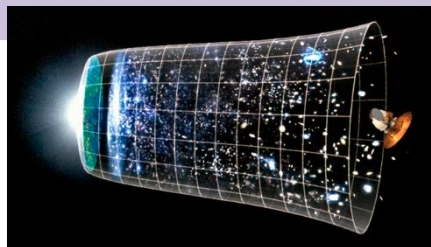
- 一般相対性理論のほころびは見つかっていない
波形が予想と一致(と無矛盾)
重力波の伝播速度も光速と一致(と無矛盾)
偏極もテンソルモードっぽいが、
他のモードがあるかどうかはまだわからない

重力波観測のこれから

- アメリカのLIGO、イタリアのVirgoに加え、日本の**KAGRA**が観測ネットワークに参加
- インドの**LIGO India**も建設中
検出器の数が増えることで、**稼働率**が向上、**波源の方向決定精度**の向上や**偏極モードの分離**が可能に
- LIGO/Virgo/KAGRAのアップグレードによる
高感度化と次世代重力波望遠鏡
さらなるイベント数、高精度なパラメータ決定
- 宇宙での**低周波**重力波観測
欧米の**LISA**計画、日本の**DECIGO**計画
地上とは異なる波源、**多波長観測**

様々な周波数にわたる重力波観測

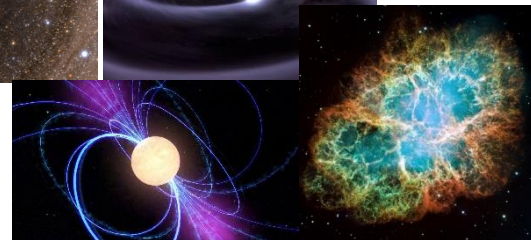
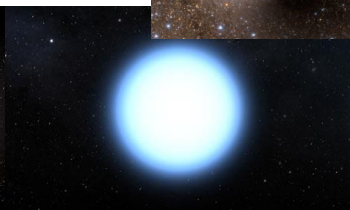
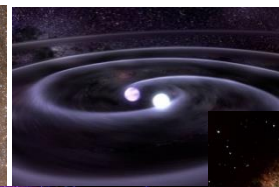
原始重力波



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

10^3

Pulsar timing



Doppler tracking

宇宙干渉計



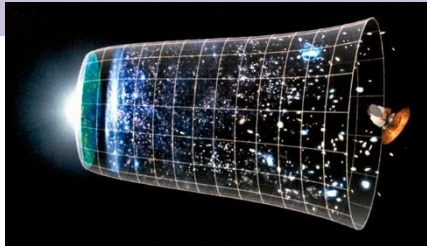
共振型

CMB B-mode

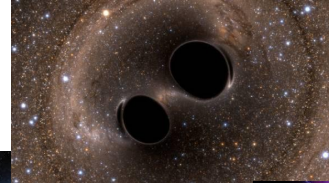


電磁波/PHzに例えると...

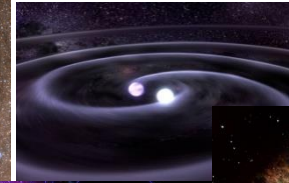
原始重力波



質量大



質量小



周期

宇宙年齢

電波

年

赤外線

紫外線

X線

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



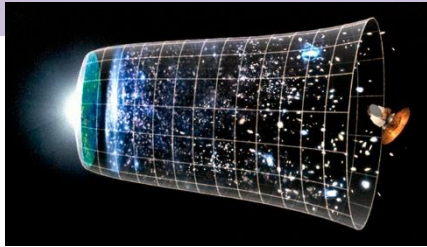
共振型

CMB B-mode

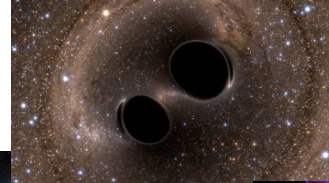


電磁波/PHzに例えると...

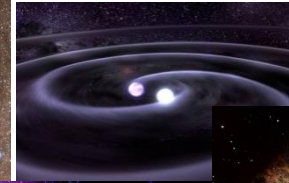
原始重力波



質量大



質量小



周期

宇宙年齢

電波

年

赤外線

紫外線

X線

周波数

Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

10^3

Pulsar timing



LISA

Doppler tracking

DECIGO

宇宙干渉計

地上干渉計

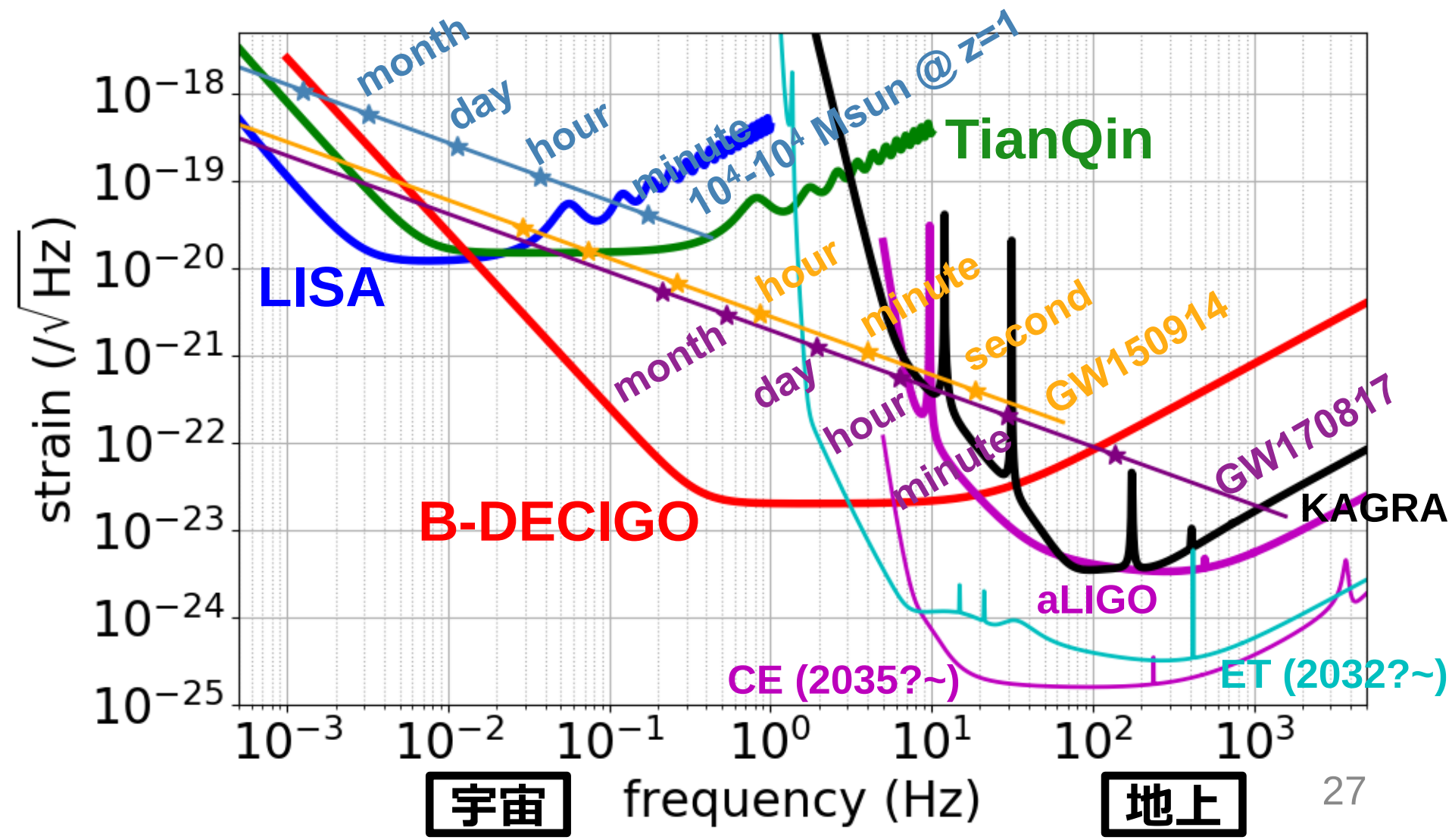
LIGO
Virgo
KAGRA

CMB B-mode



宇宙と地上での多波長観測

- 宇宙望遠鏡で合体時刻の予測が可能



重力波はどう検出するか？

- レーザー干渉計を使う
- 1960年代、レイ・ヴァイス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



2017年ノーベル物理学賞

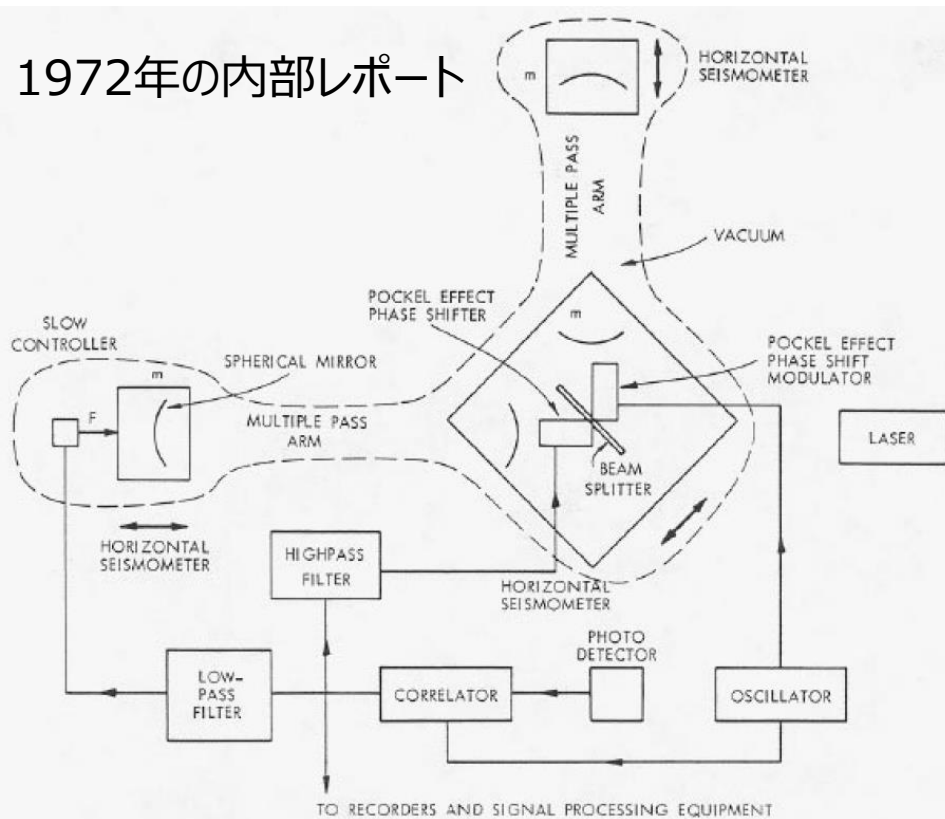
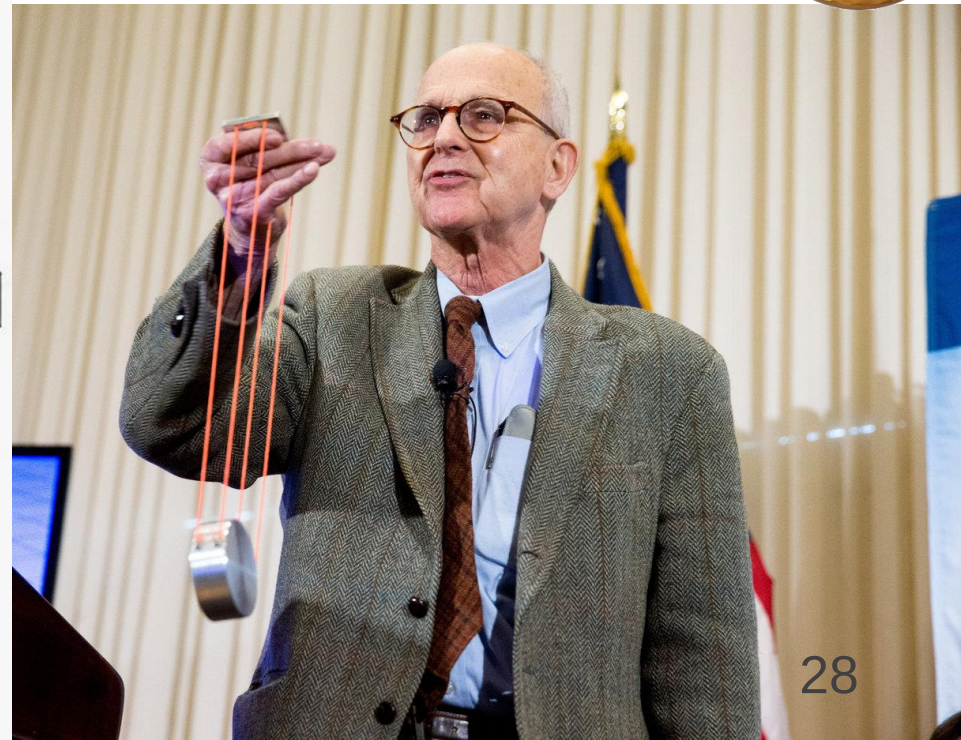
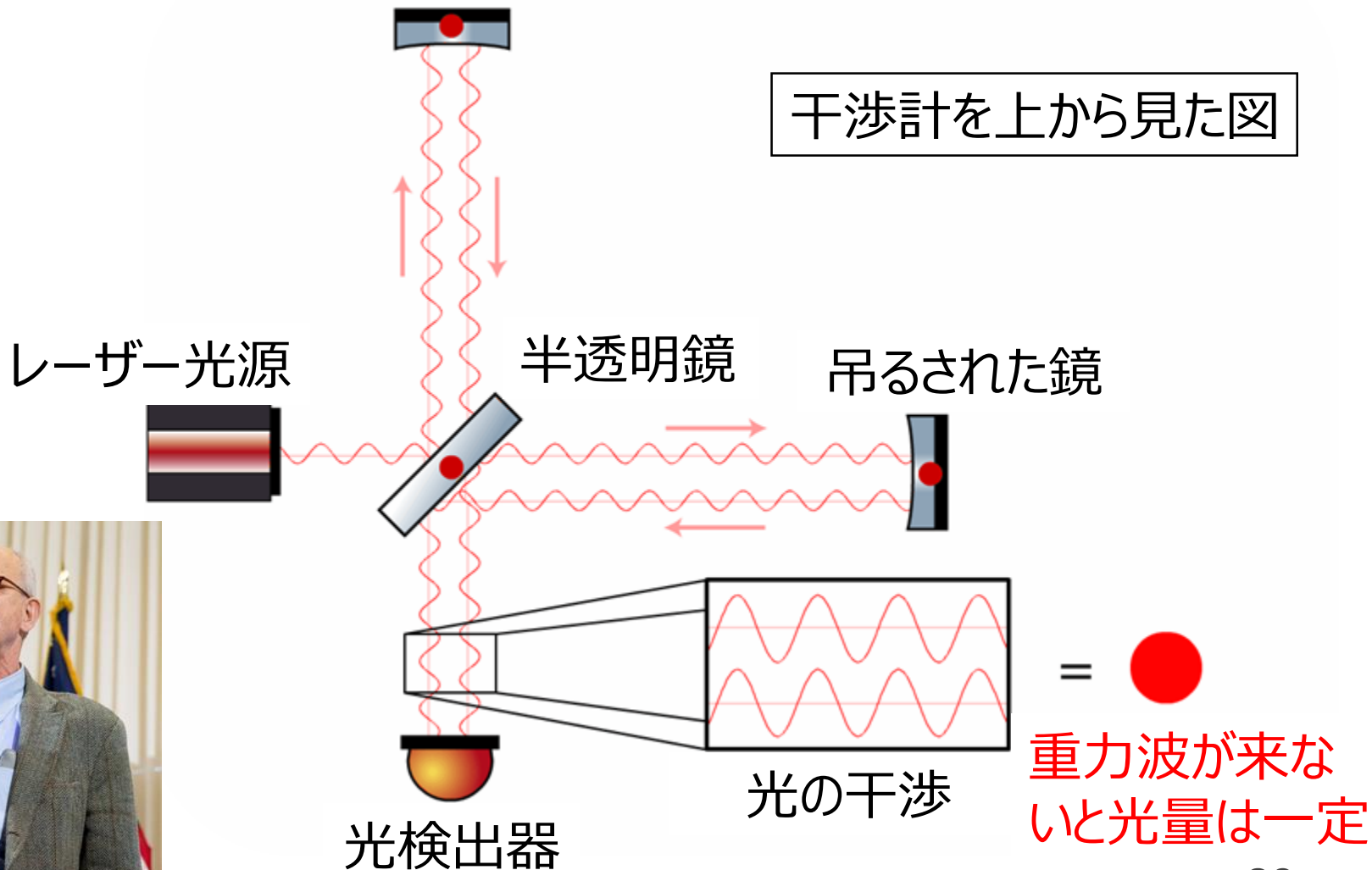


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



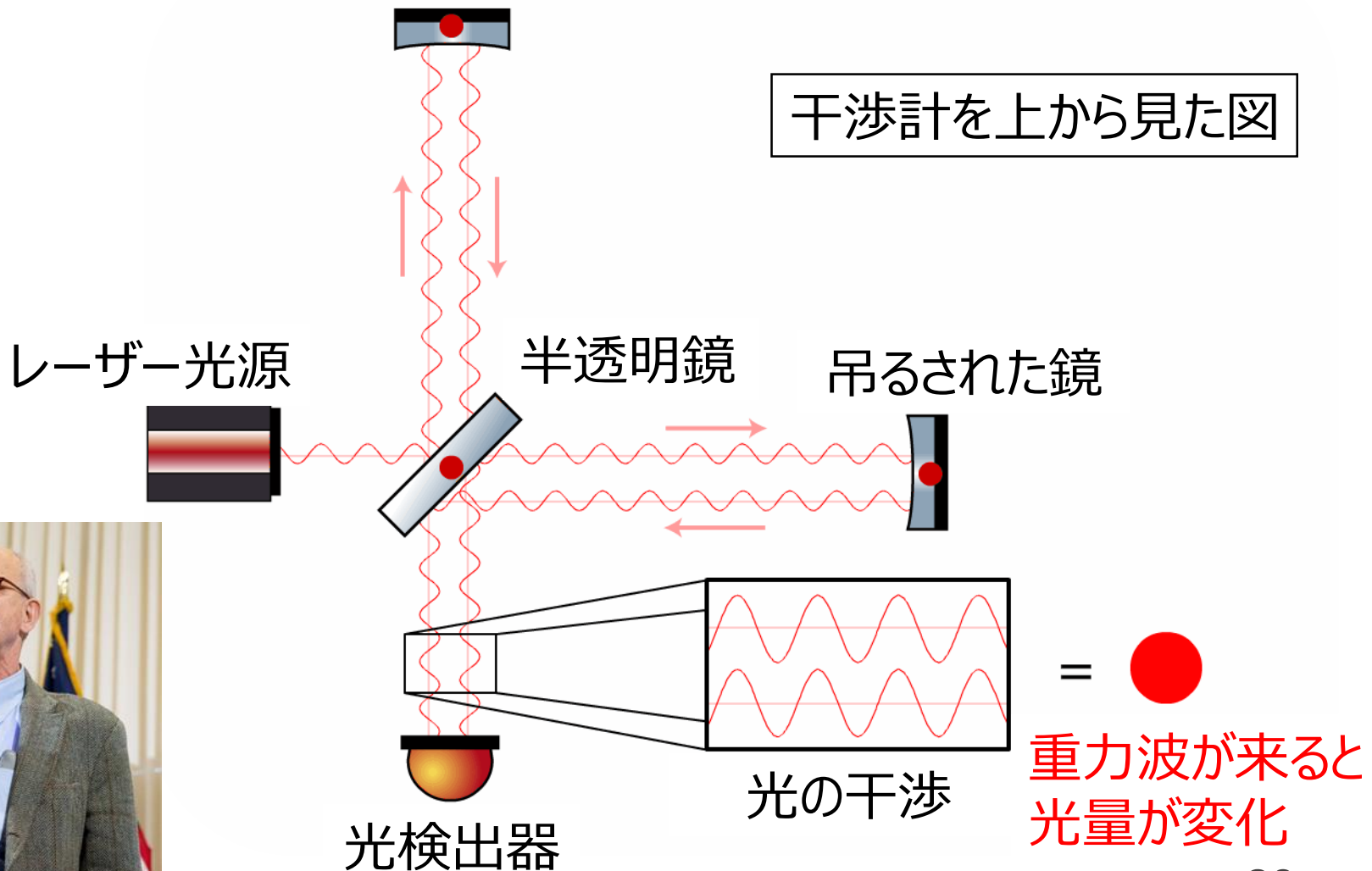
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



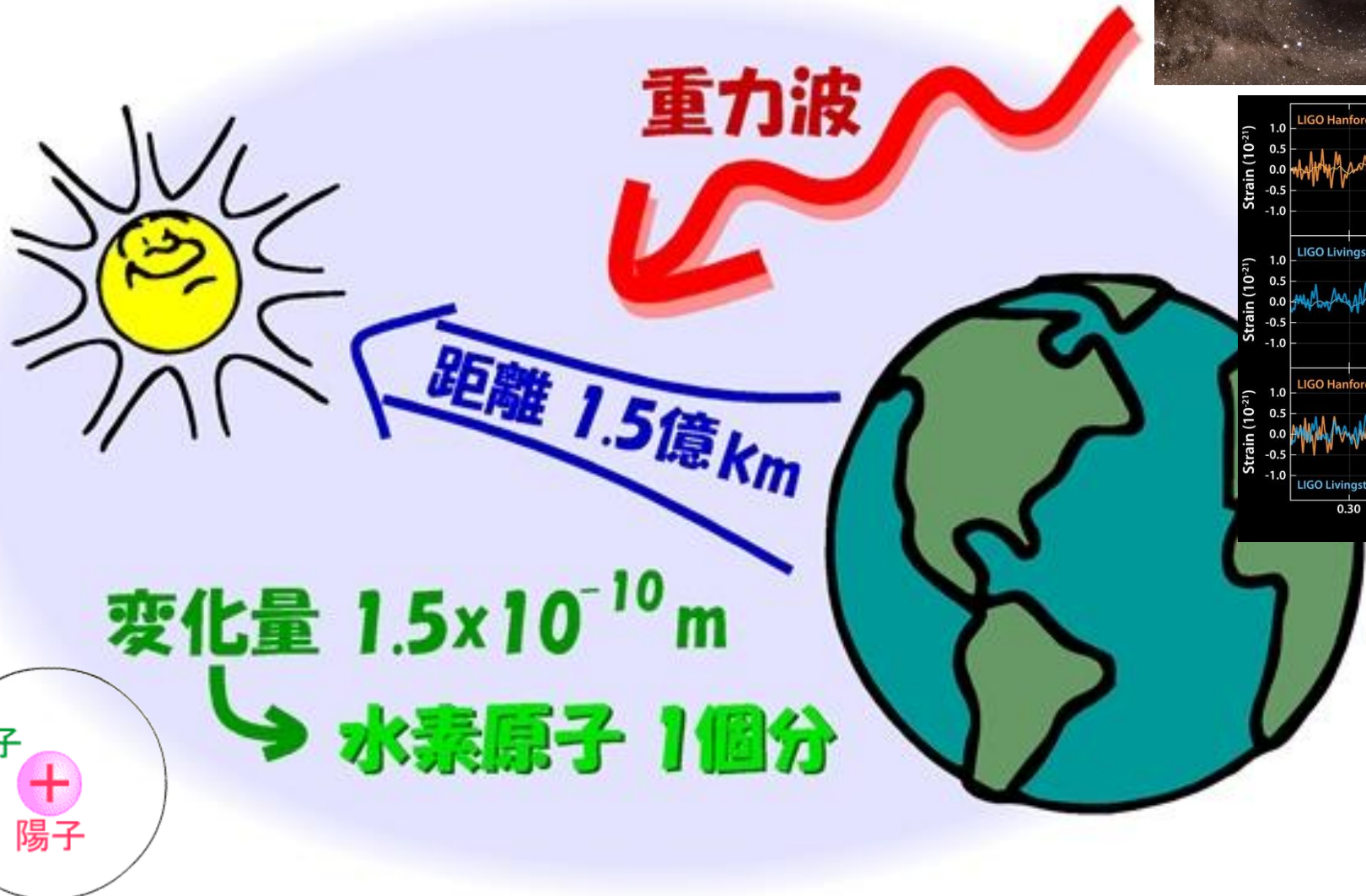
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



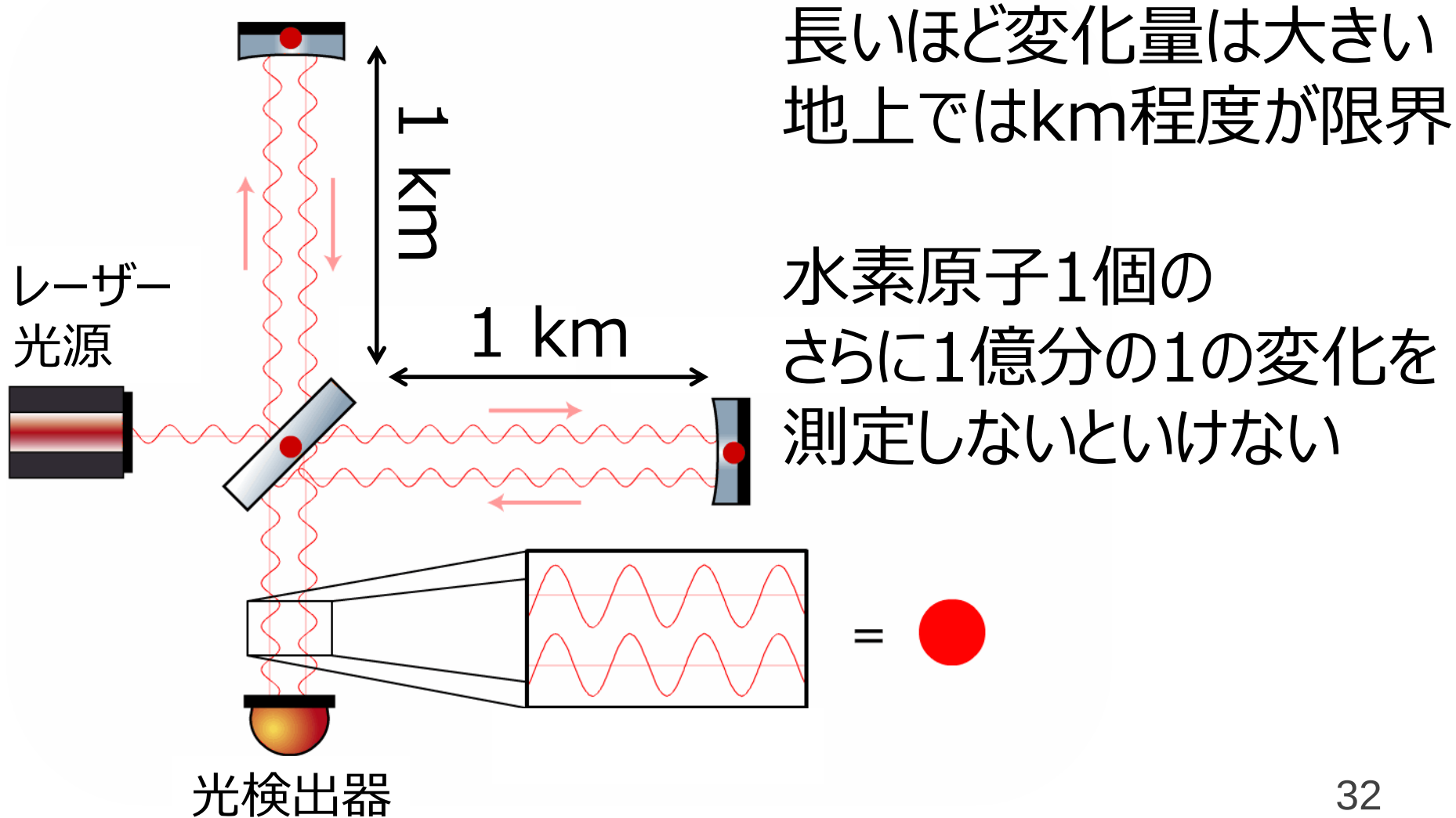
重力波の振幅はどれくらい？

- 空間のひずみ量: 10^{-21} (典型的に)



重力波の振幅はどれくらい？

- 空間のひずみ量: 10^{-21} (典型的に)



重力波国際観測ネットワーク

- 微弱な信号の観測には複数台での観測が必須
- どれもレーザー干渉計型

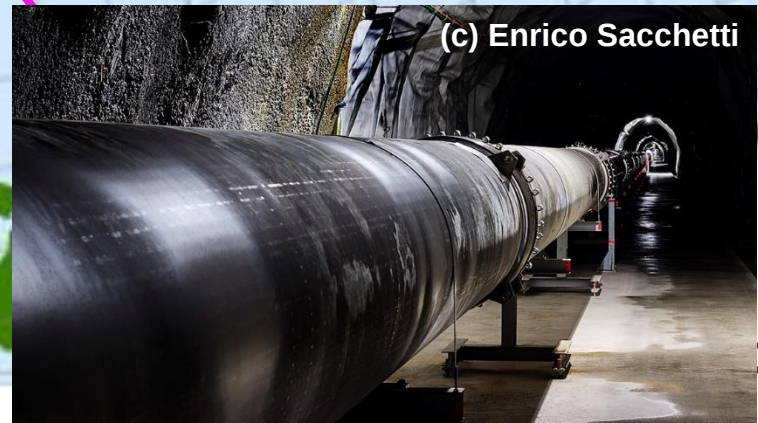
GEO-HF



Advanced Virgo



KAGRA



Advanced LIGO



Advanced LIGO

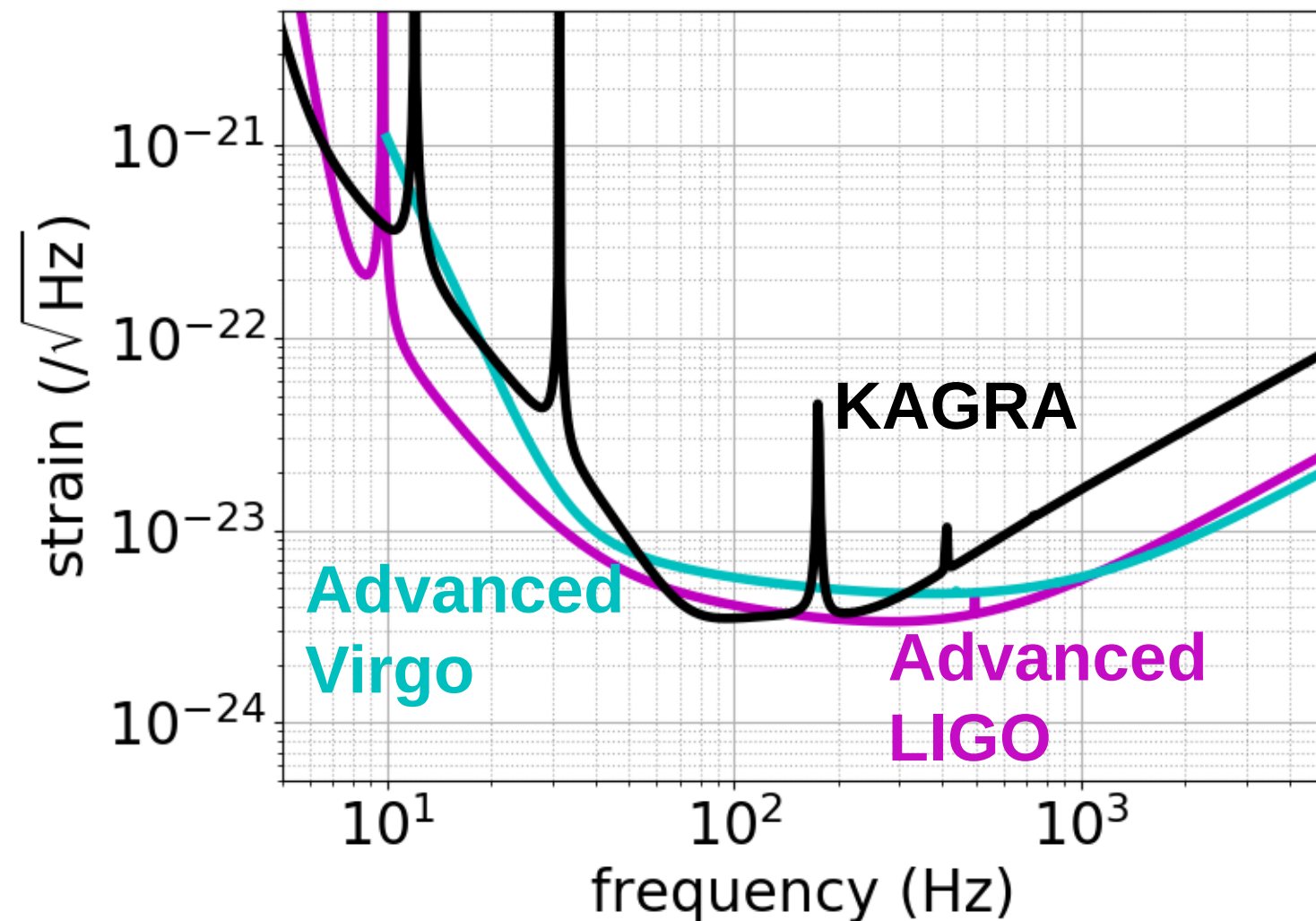


LIGO-India (approved)



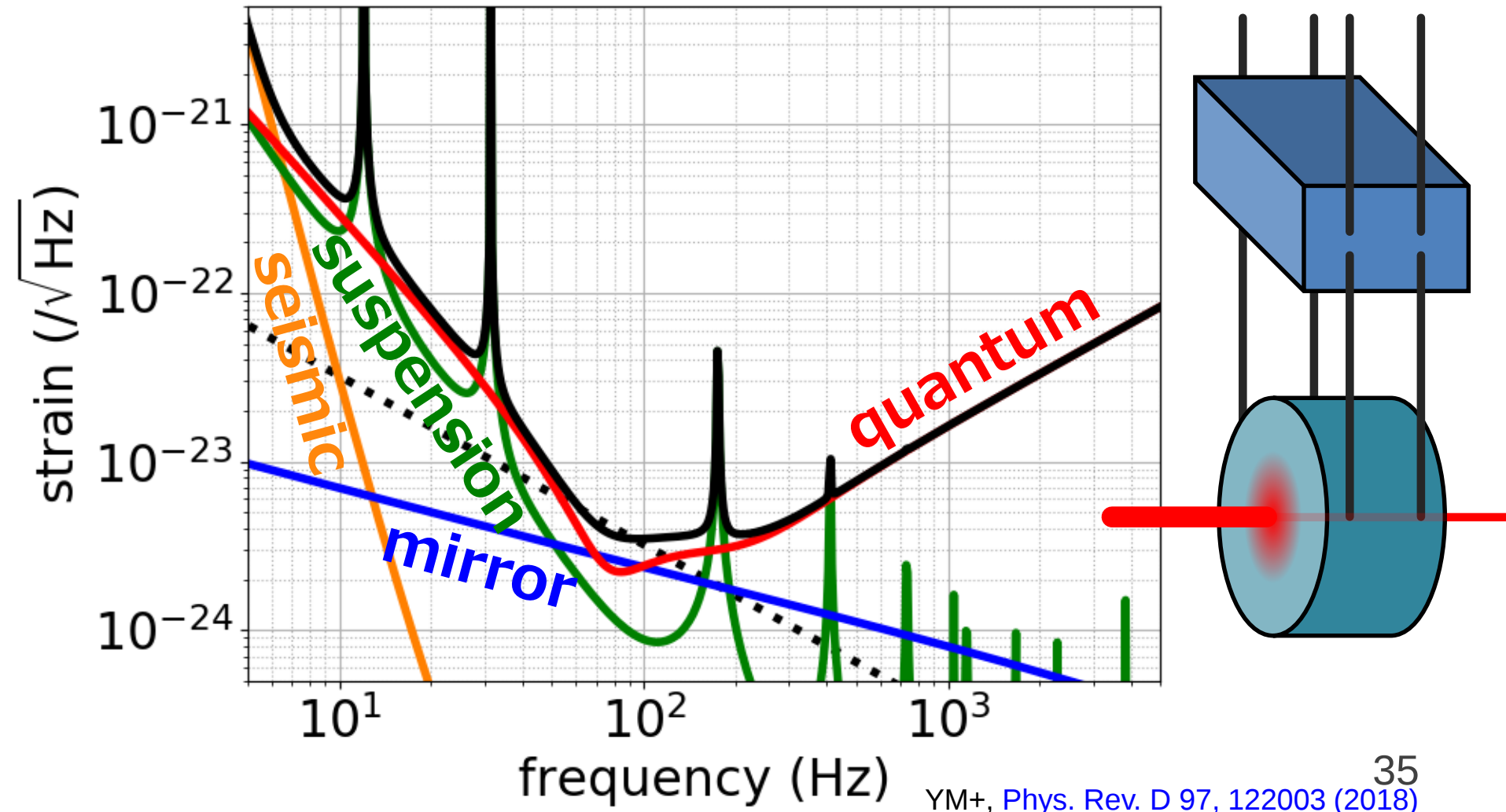
設計感度

- Advanced LIGO、Advanced Virgo、KAGRAはどれも同等の設計感度



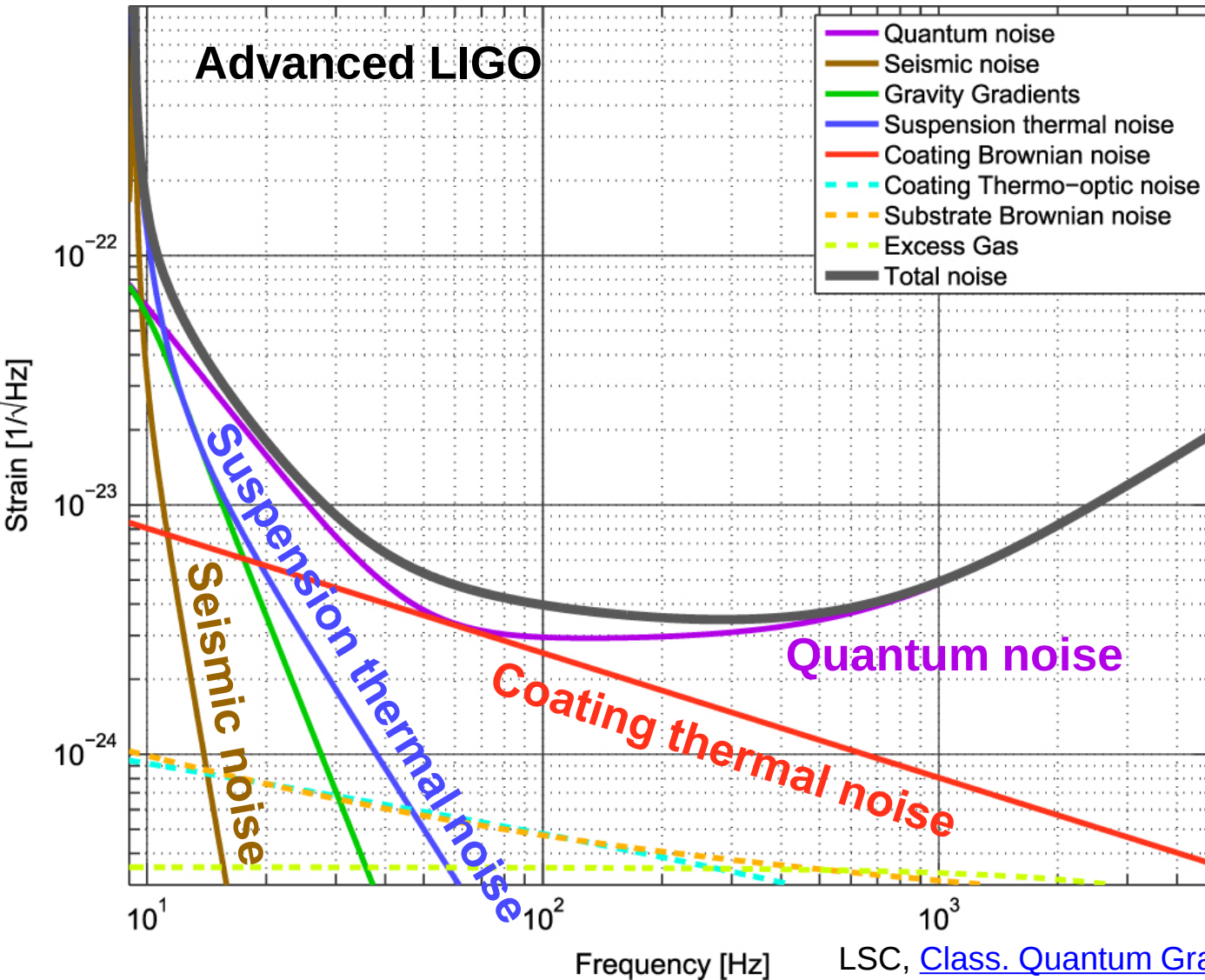
原理的な雑音源

- ほとんど量子雑音で、地面振動雑音、サスペンション熱雑音、鏡の熱雑音も重要



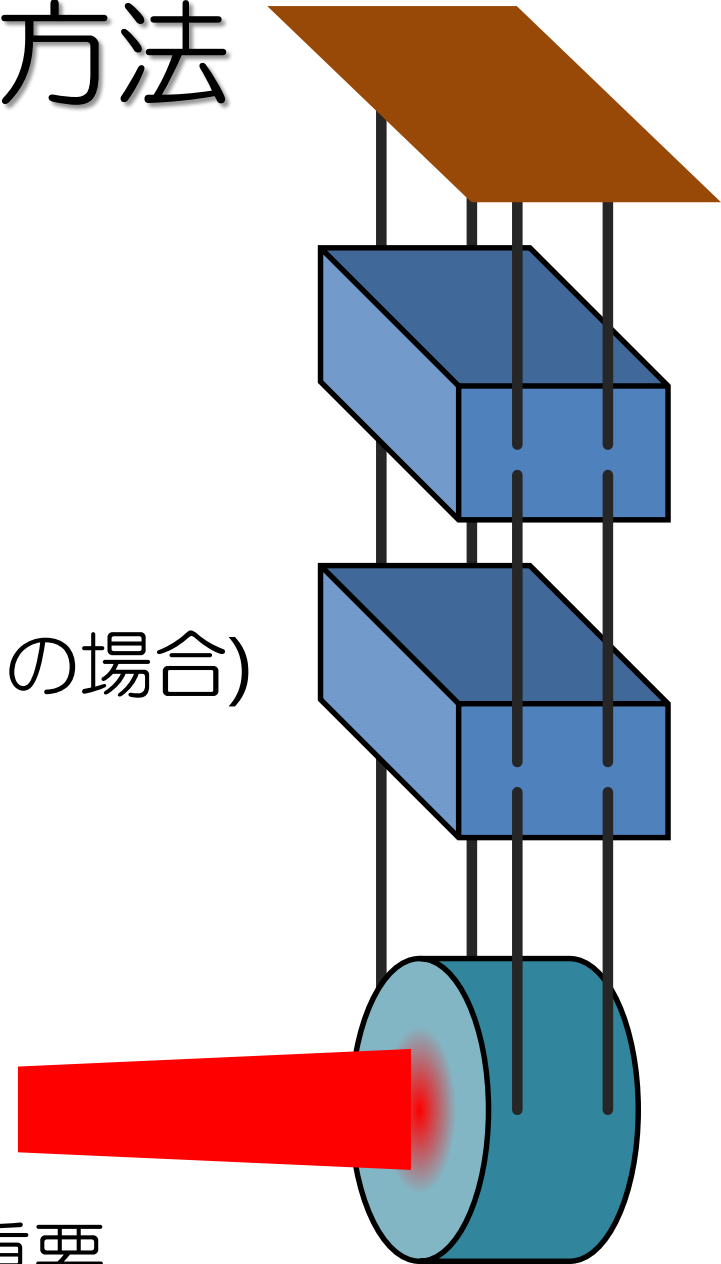
原理的な雑音源

- Advanced LIGOも同様に、ほとんど量子雑音



雑音源と低減方法

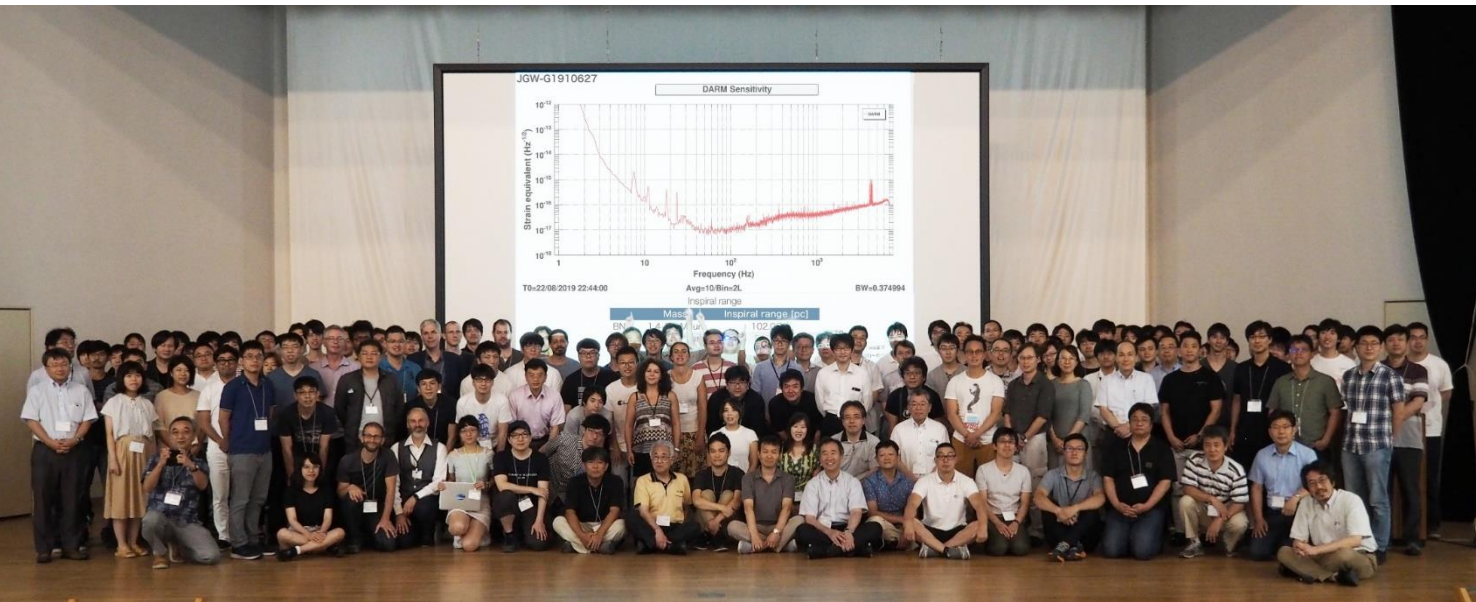
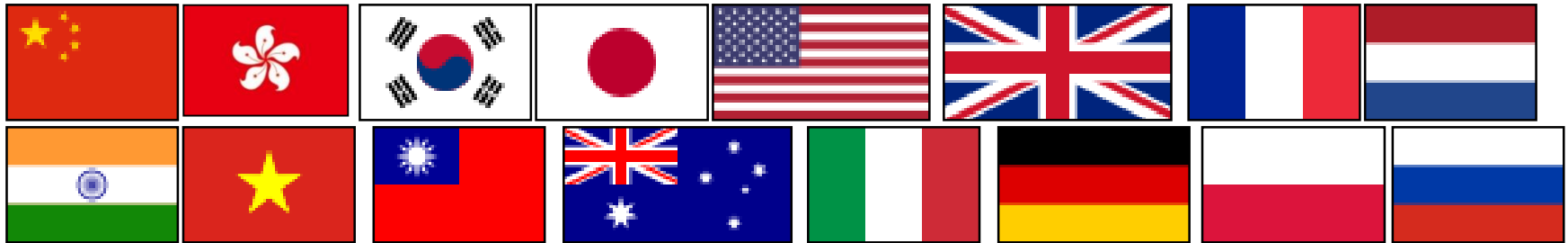
- 地面振動雑音
多段懸架で防振
- 鏡とサスペンションの熱雑音
機械的散逸の少ない材質
低温化 (KAGRAのみ)
ビーム径の大型化 (鏡熱雑音の場合)
- 量子雑音
レーザーパワーの最適化
干渉計構成の工夫
鏡の大質量化
- 長基線長化、鏡の大質量化が重要



KAGRA計画



- 2010年に予算化
 - 129 institutes, 495 collaborators (163 authors)
as of Dec 2020
 - 低温と地下建設が特徴
- 参加大歓迎！



Aug 2019
F2F meeting
@ Toyama

KAGRAの所在地

- 岐阜県飛騨市 池ノ山の中にある



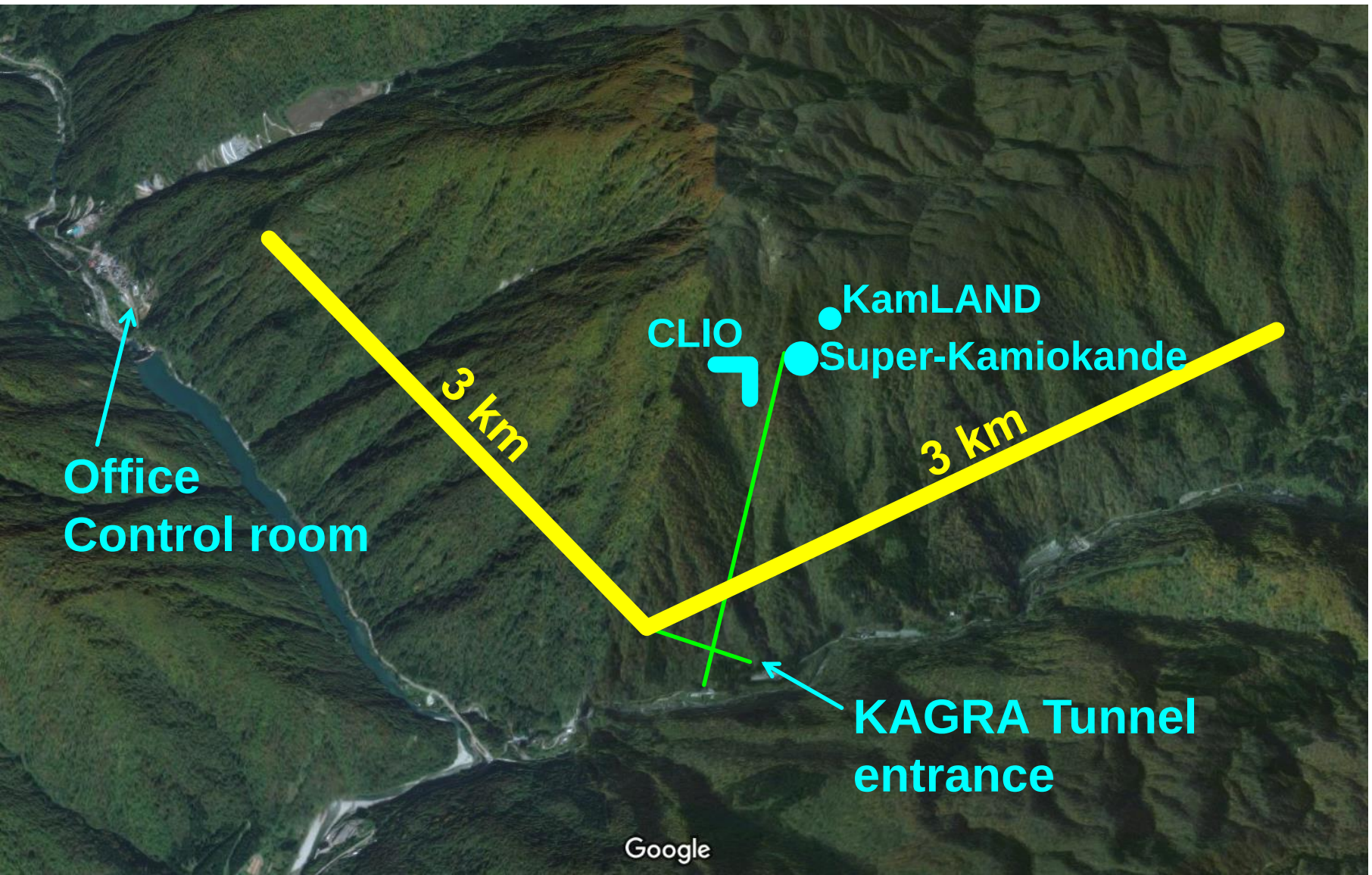
東京から新幹線で2時間半



富山駅から
車で1時間

KAGRAの所在地

- 岐阜県飛騨市 池ノ山の中にある



かぐらトンネル

- 2本の3km真空パイプ
の中をレーザー光が
往復

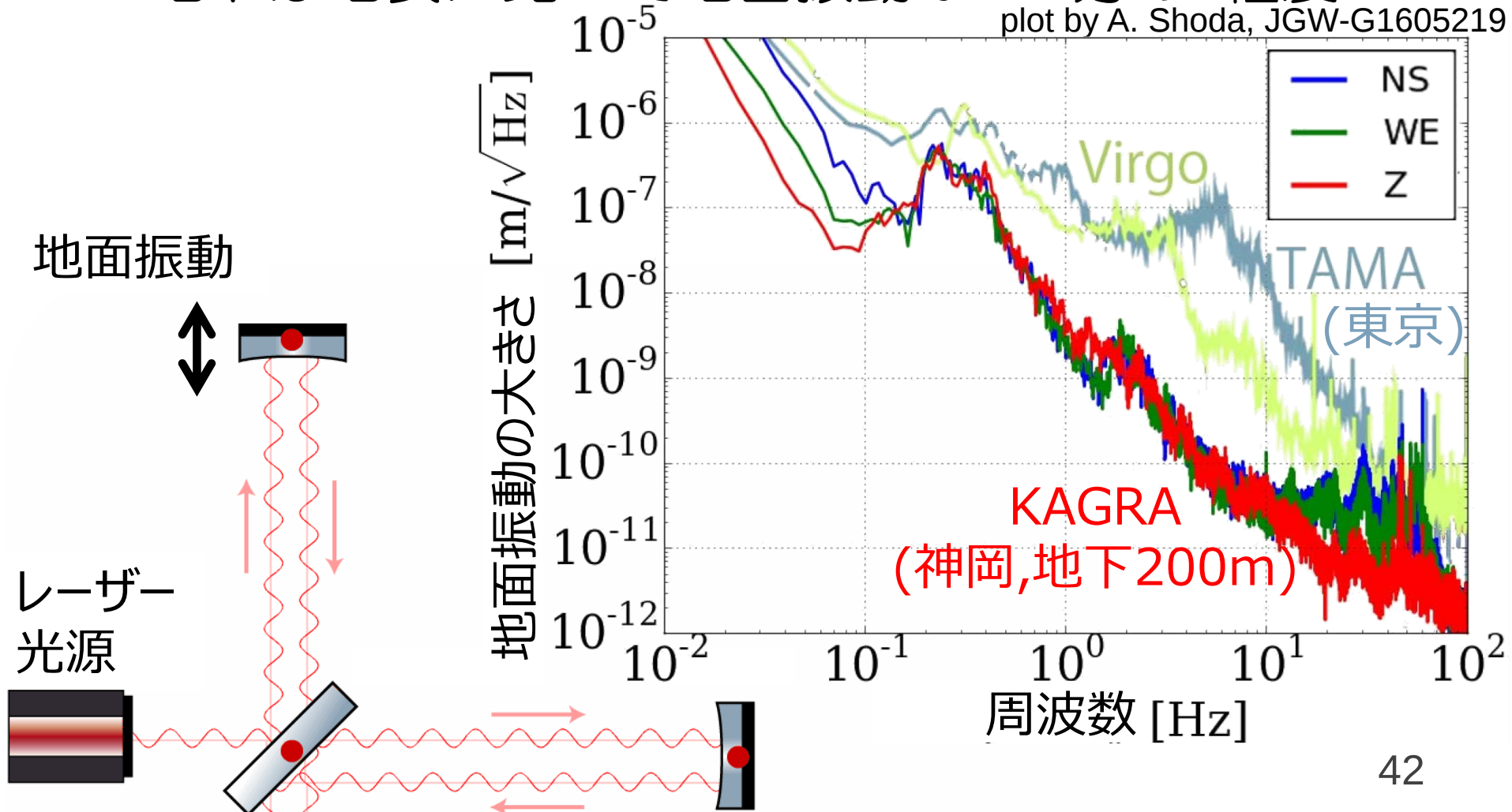


Entrance
(2016.2.8)



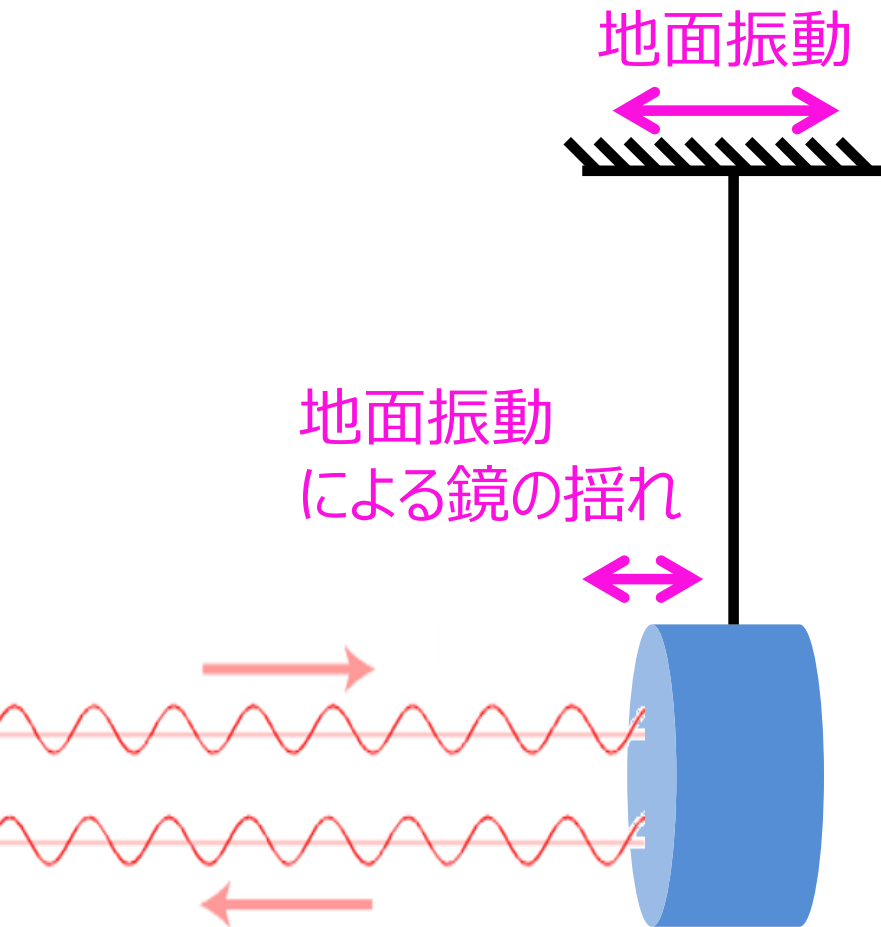
地下建設で地面振動低減

- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度



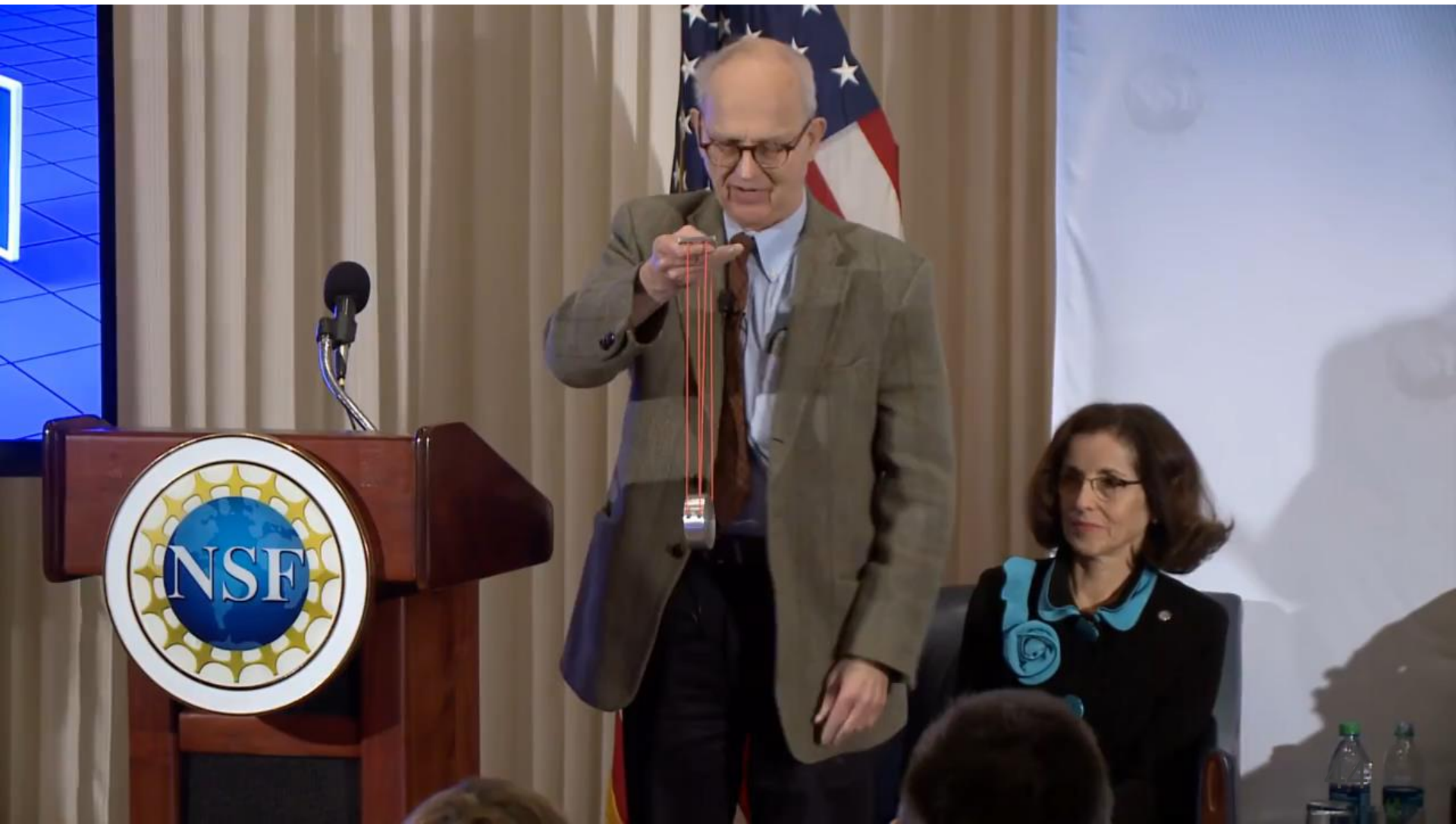
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



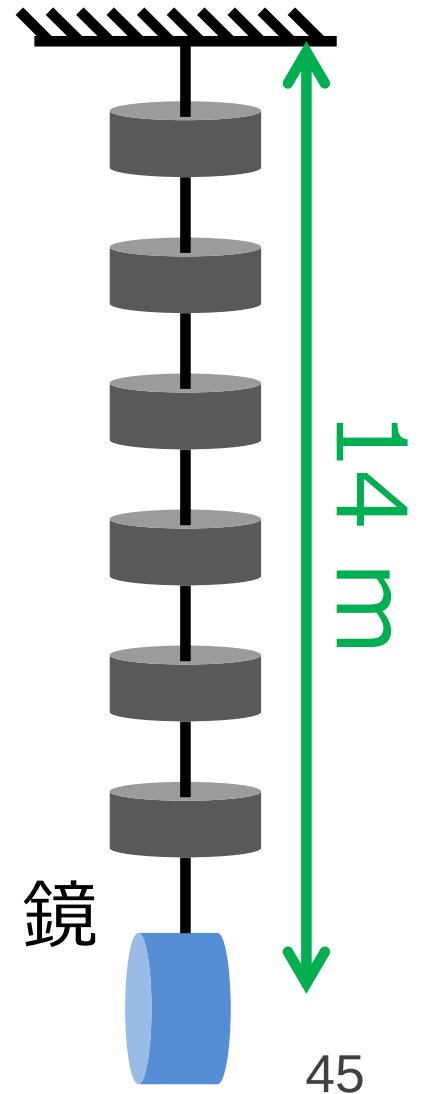
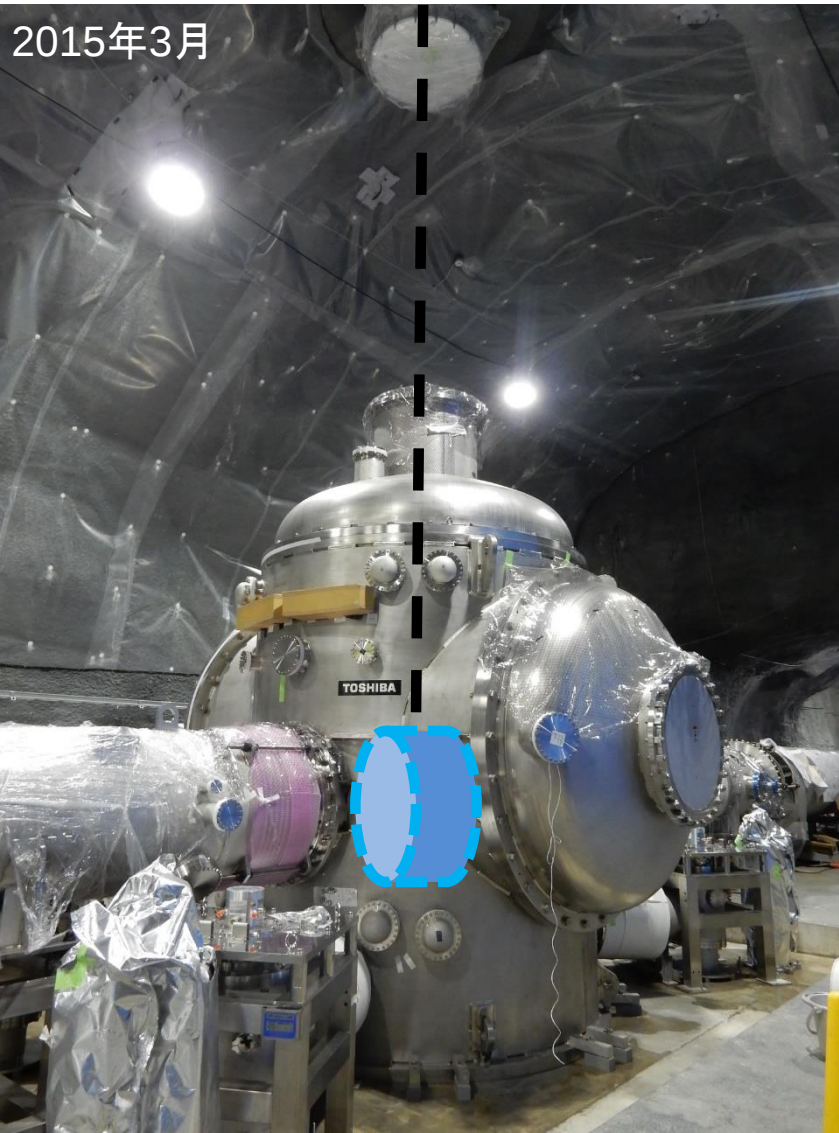
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



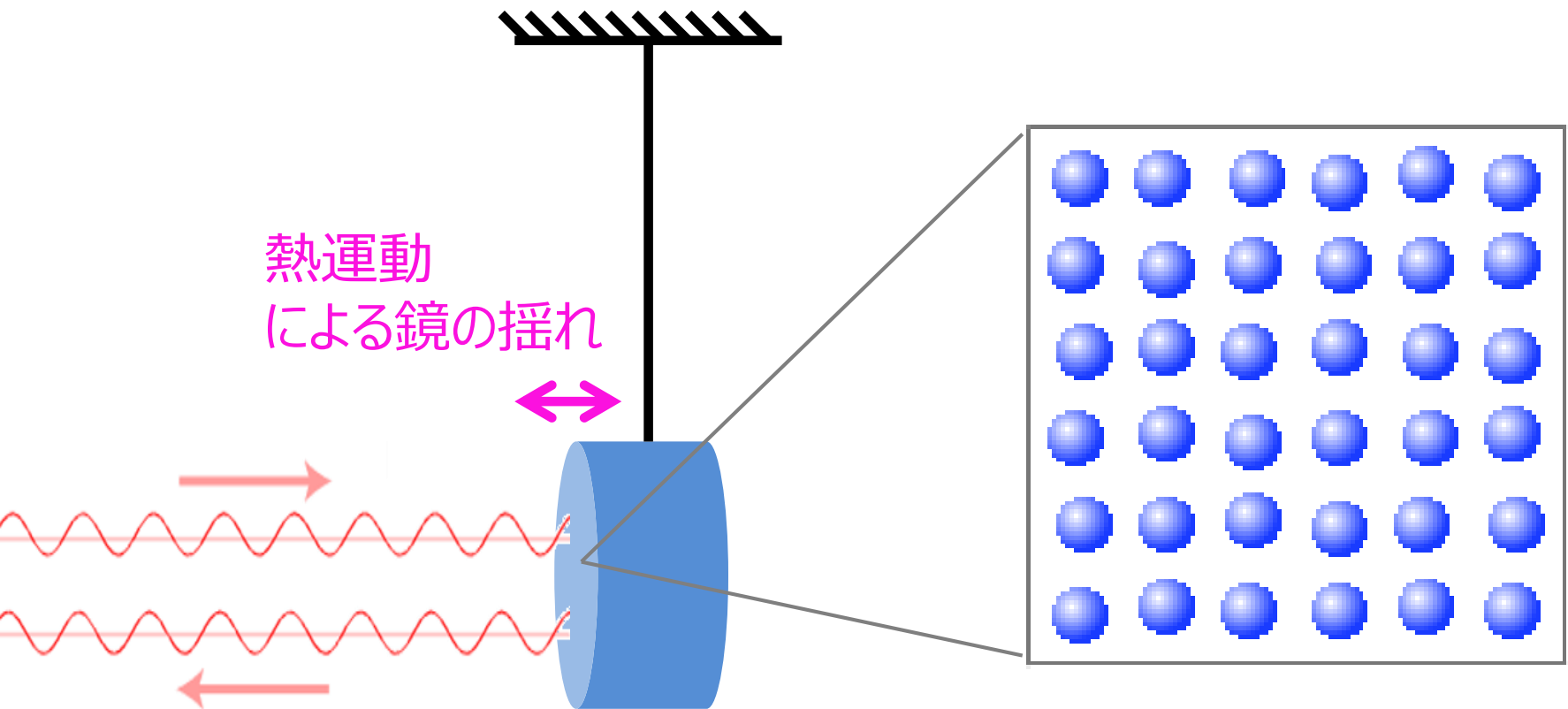
KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

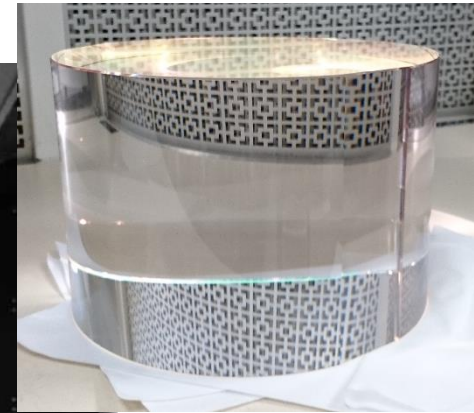
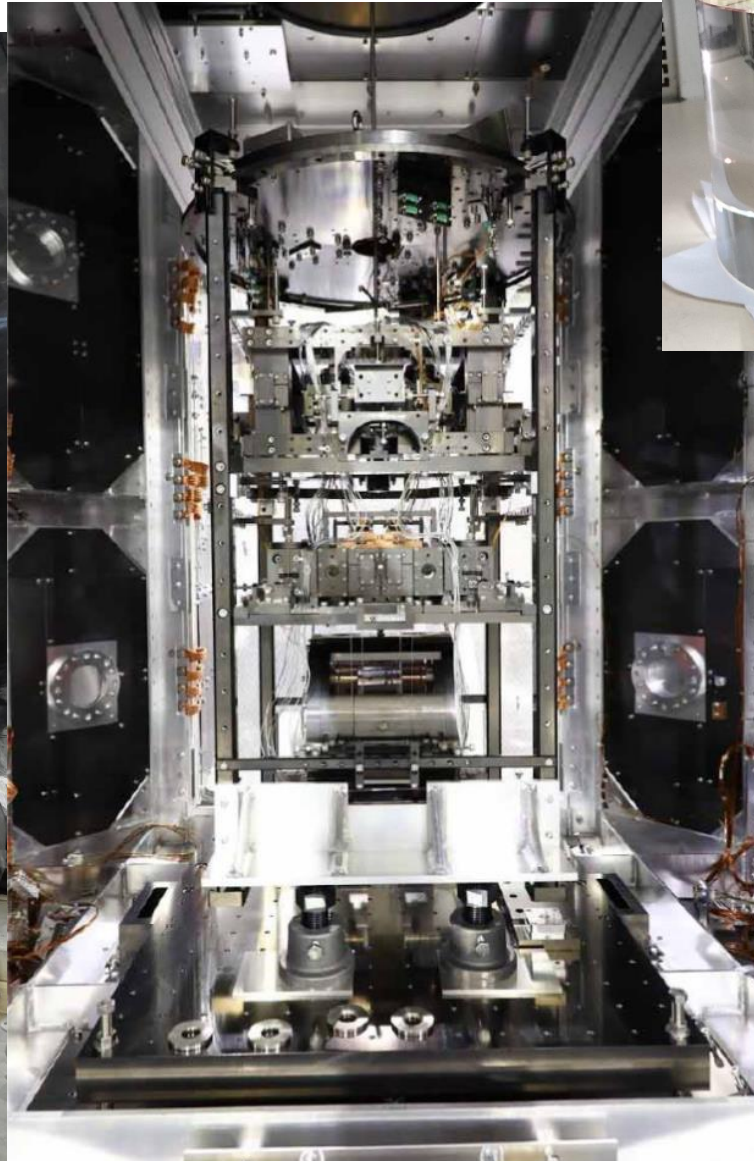
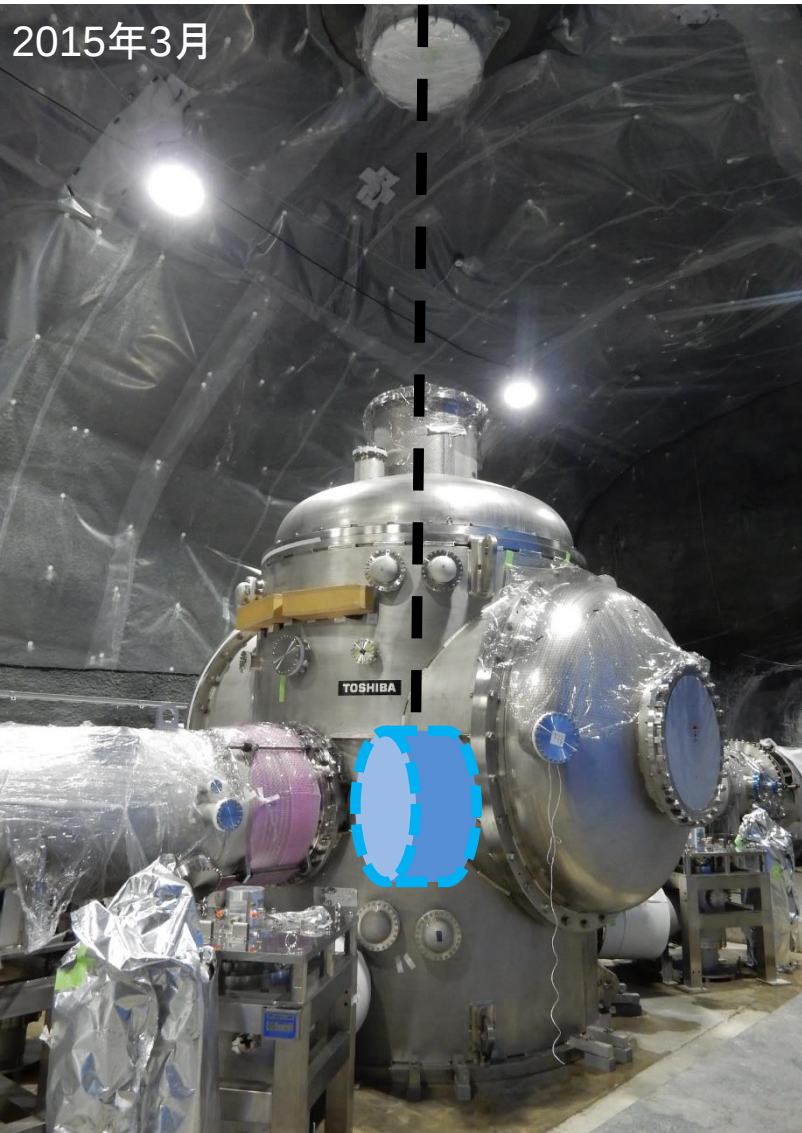


鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 鏡を作る原子の熱運動で鏡の表面が揺れると、雑音になる
- -253°C まで冷やすことで熱運動を小さくする



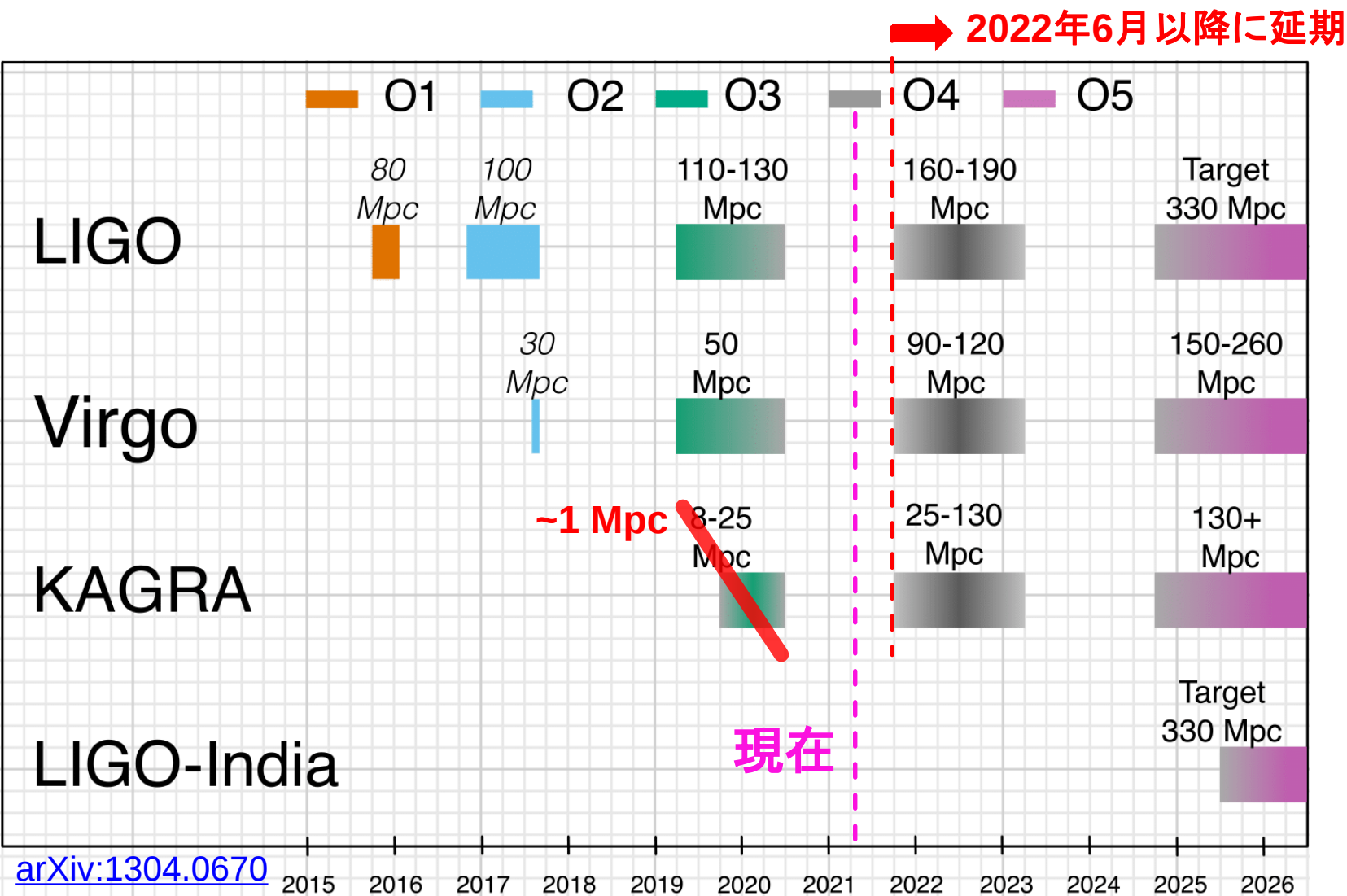
KAGRAの低温懸架装置



サファイア鏡
直径 22 cm
厚さ 15 cm

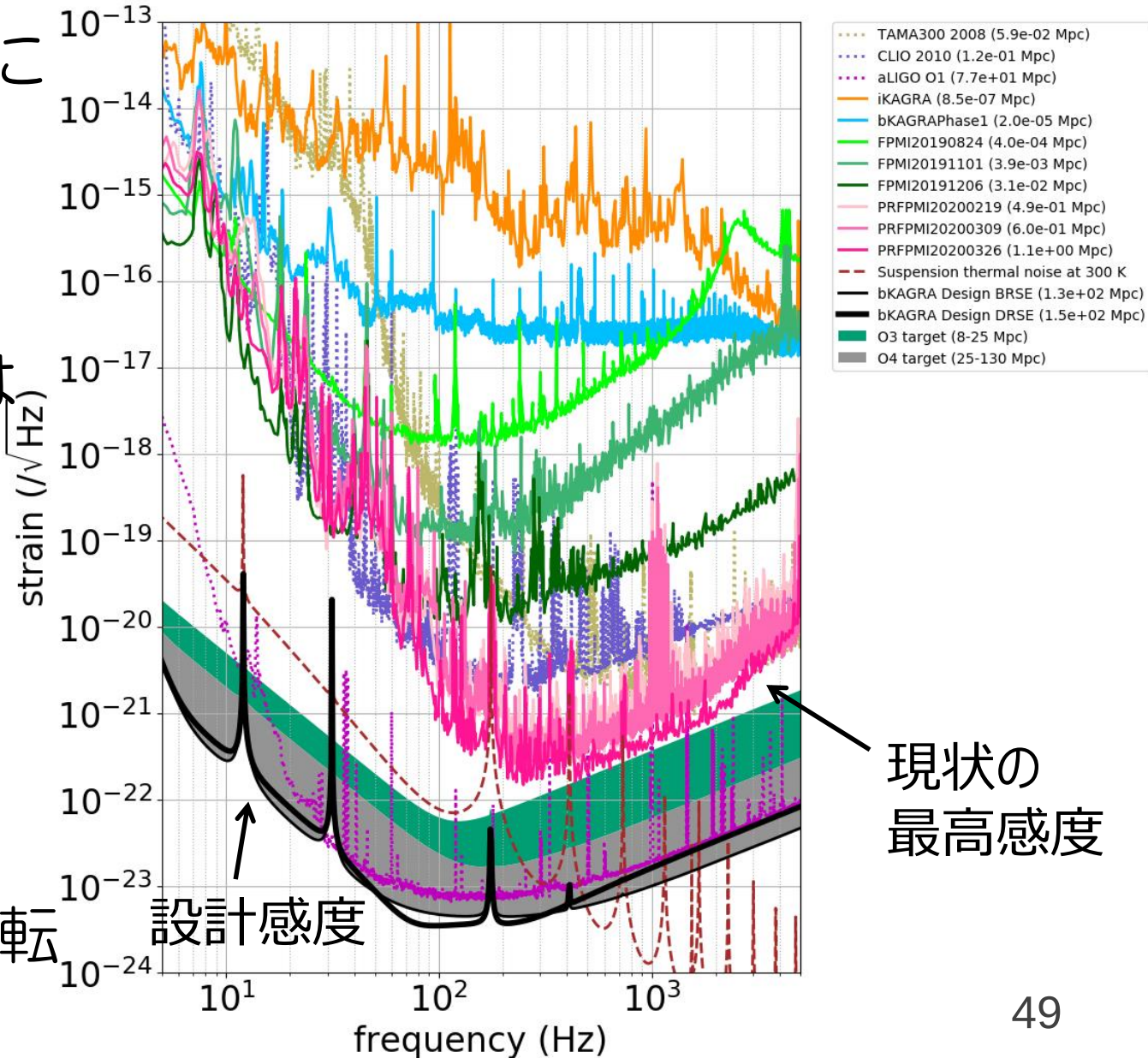
国際共同観測スケジュール

- 調整をはさんで感度を上げながら、共同観測



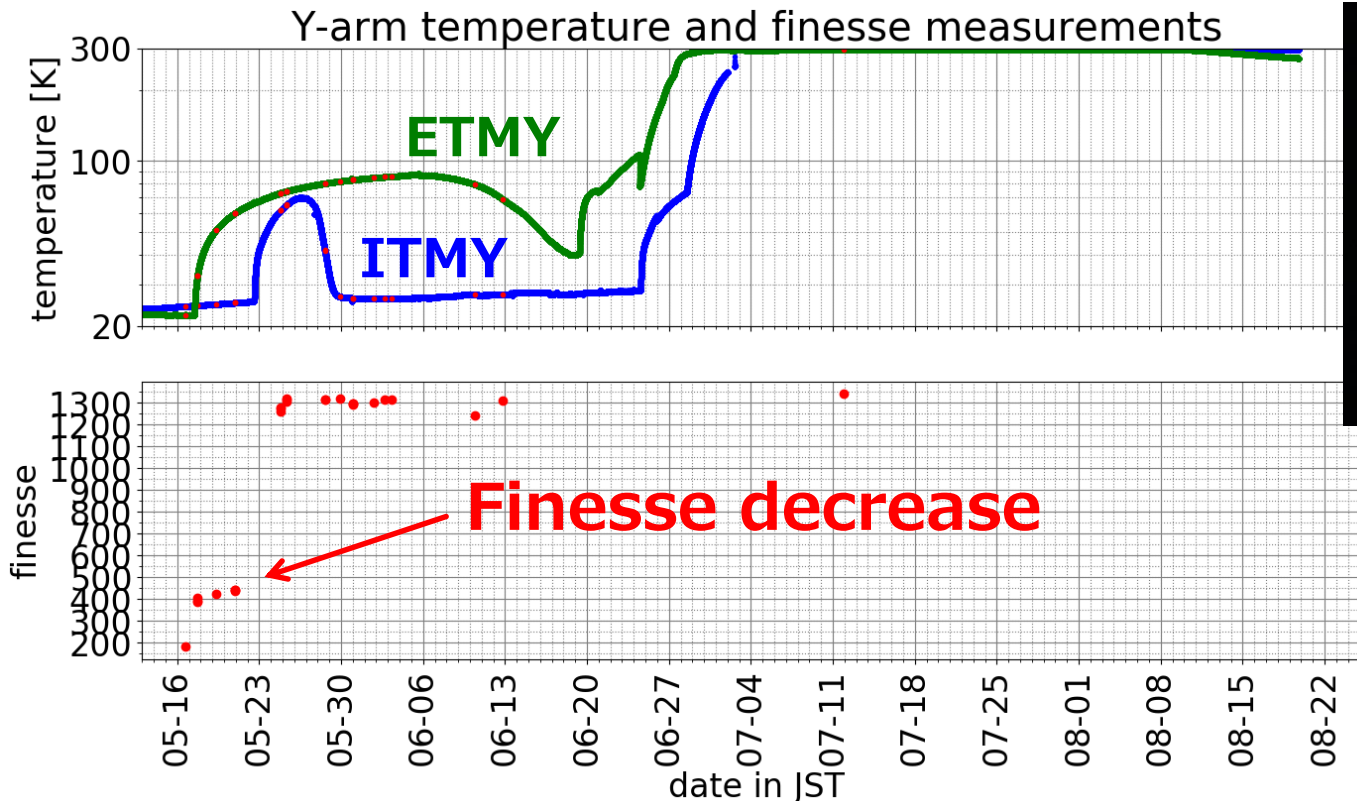
KAGRAの感度

- 2020年3月に
最高感度
~1 Mpcを
達成
- O3観測では
当初の目標
を達成
できず
- 2020年4月
にドイツの
GEOとの
共同観測運転



冷却による霜の影響

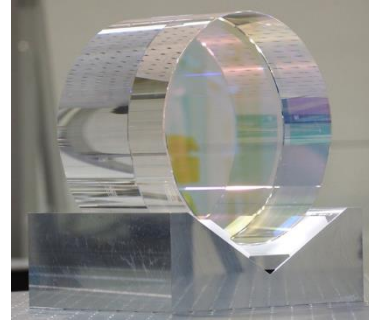
- 腕共振器のフィネスが30 K程度以下で低くなる
- 残留ガスが鏡で氷結したため
- よりよい真空中で冷やす必要がある
- O3観測では約250 Kで運転



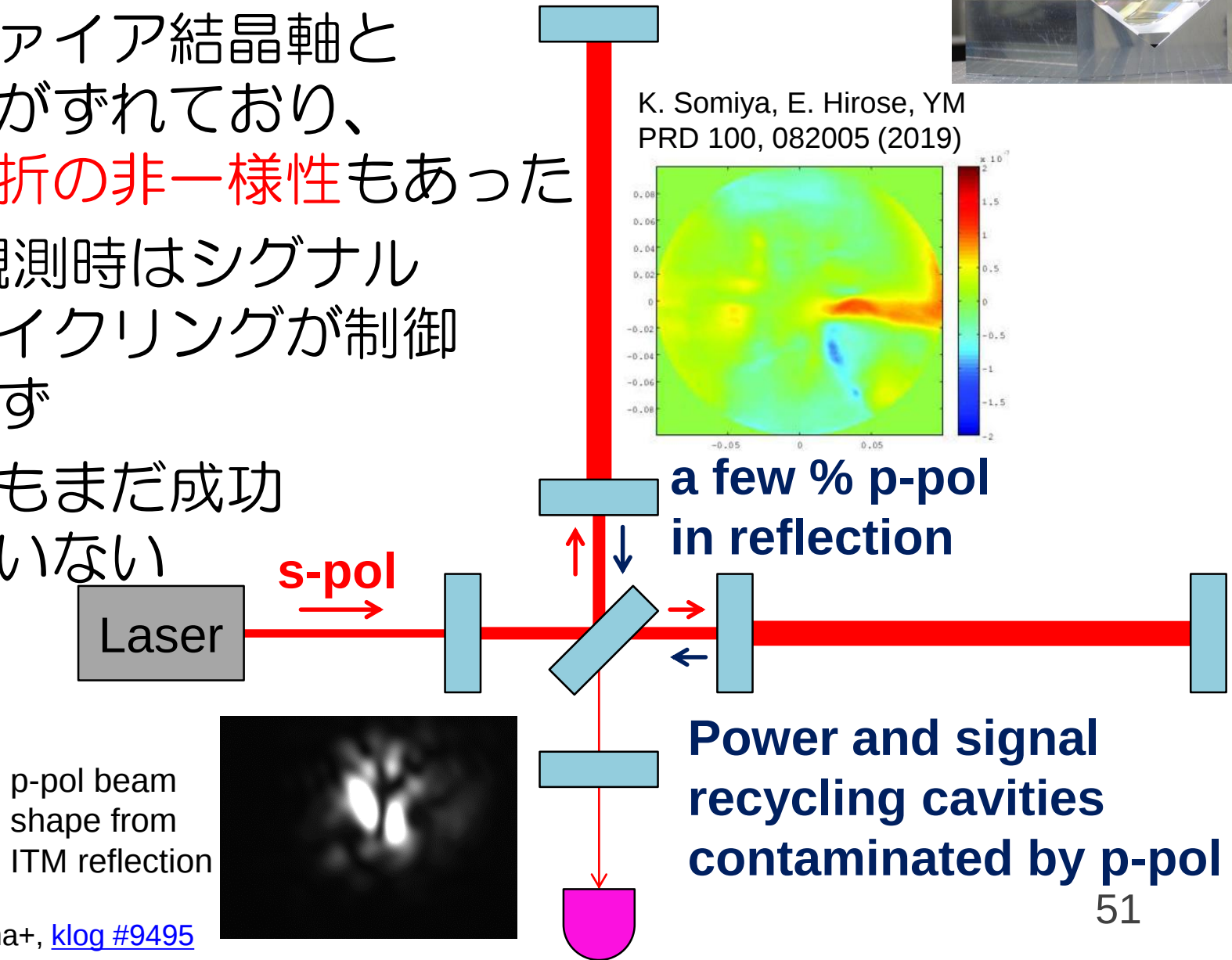
Frosted mirror
seen with
green laser

Y. Enomoto+, [klog #9861](#)

複屈折の影響

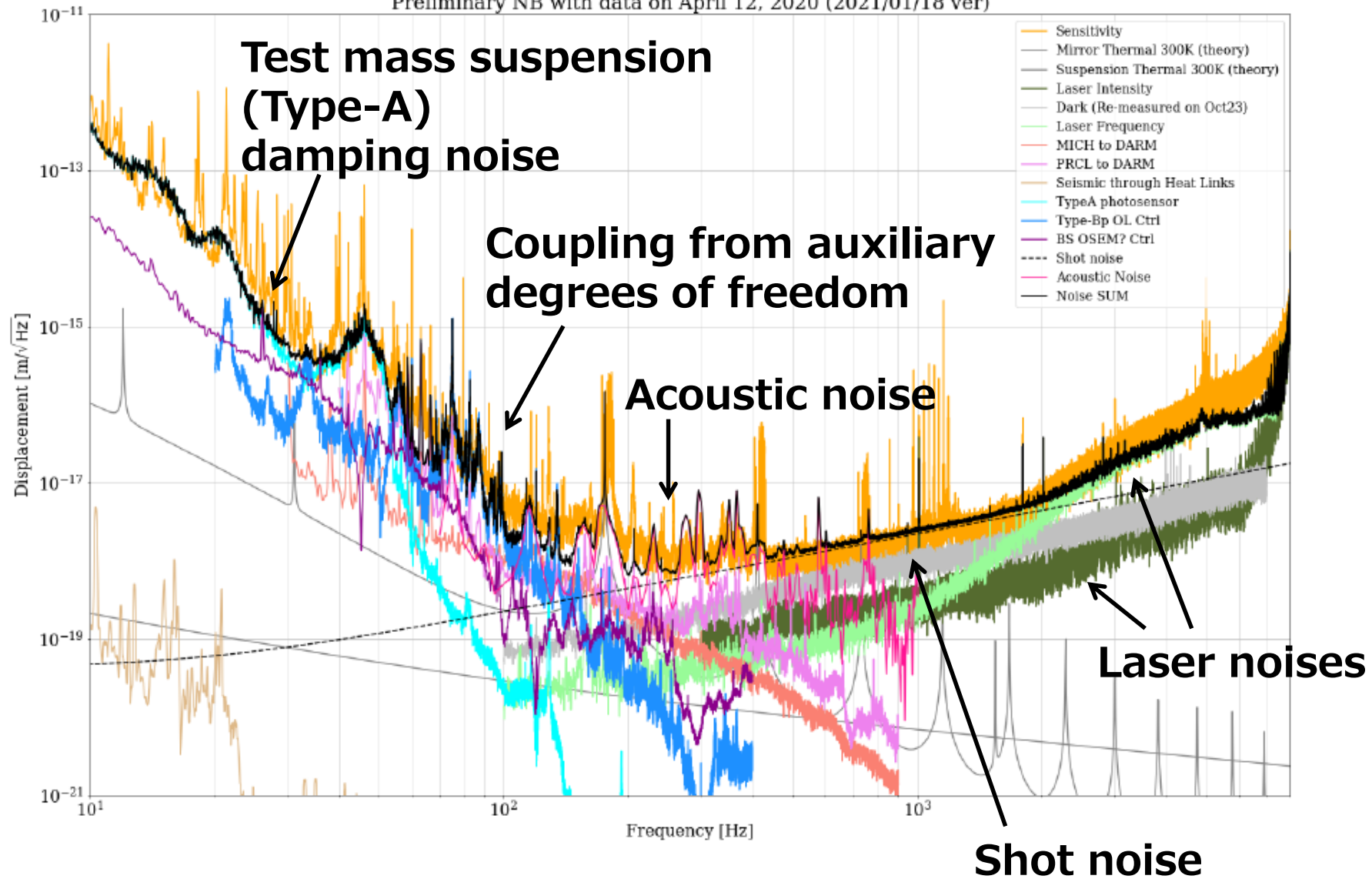


- サファイア結晶軸と光軸がずれており、
複屈折の非一様性もあった
- O3観測時はシグナルリサイクリングが制御できず
- 現在もまだ成功していない



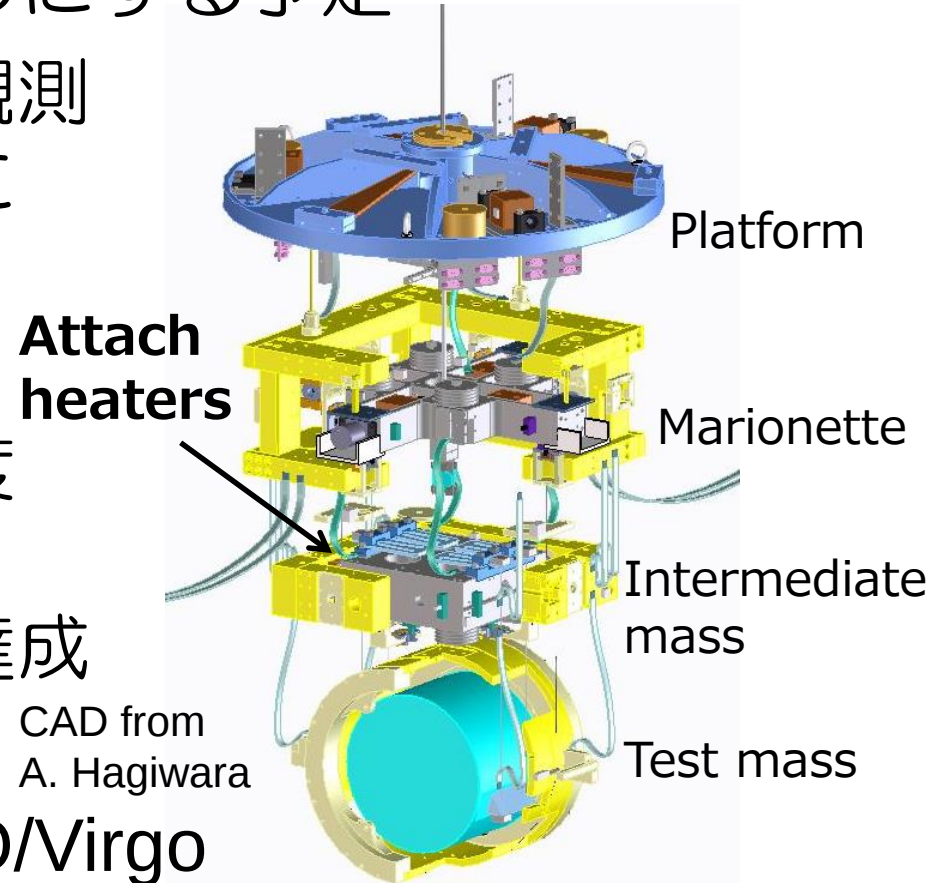
O3観測時のノイズバジェット

Preliminary NB with data on April 12, 2020 (2021/01/18 ver)



今後の予定

- 霜については、ヒーターの導入により解決し、**20 K**まで冷却できるようにする予定
- 複屈折については次期観測
までには新しい鏡は間に
合わない
- **サスペンションの改良**
などにより、低周波感度
の改善と、**シグナル**
リサイクリングの制御達成
を目指す
- **2022年にO4観測**をLIGO/Virgo
と共同で開始予定(25 Mpcが最低目標)



まとめ

- 一般相対性理論の成立から100年、ついに重力波が初検出された
- 現在までに50個のイベントが見つかっており、日常的に検出が報告される時代に
- 重力波天文学はまだまだ始まったばかりでいろいろな謎が残されている
- 重力波の検出にはレーザー干渉計を使う
- 様々な雑音を低減させた究極の精密測定装置
- 日本にはKAGRA(かぐら)があり、重力波天文学のさらなる発展に寄与する
- 地上望遠鏡の高感度化計画、宇宙望遠鏡計画も進行中で、ますます目が離せない