

レーザー干渉計による 重力波観測

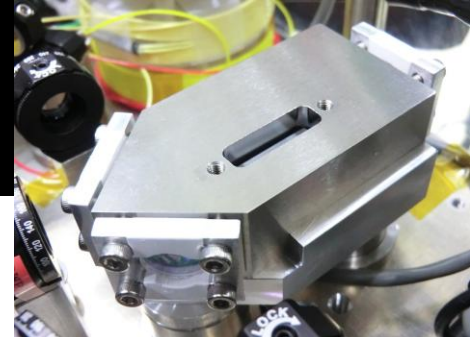
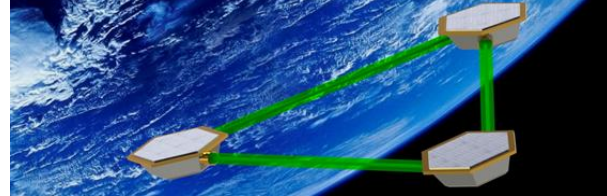
道村唯太

東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター
michimura@resceu.s.u-tokyo.ac.jp



<https://tinyurl.com/YM20260609>

みちむら ゆうた
道村 唯太



2010

東京大学 大学院理学系研究科
物理学専攻 坪野研究室

2014

2015

← 博士(理学)取得



東京大学 大学院理学系研究科
物理学専攻 助教
(安東研究室)



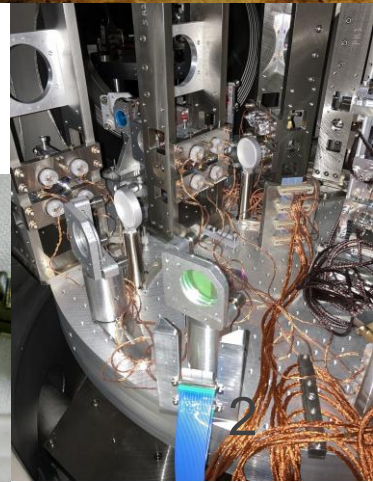
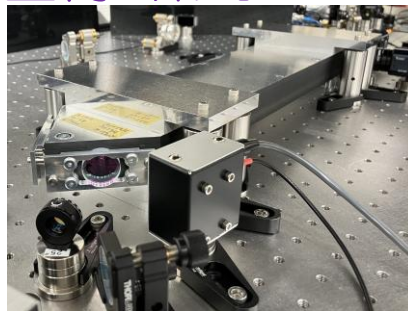
2022

カリフォルニア工科大学
Research Scientist at LIGO Lab

2024

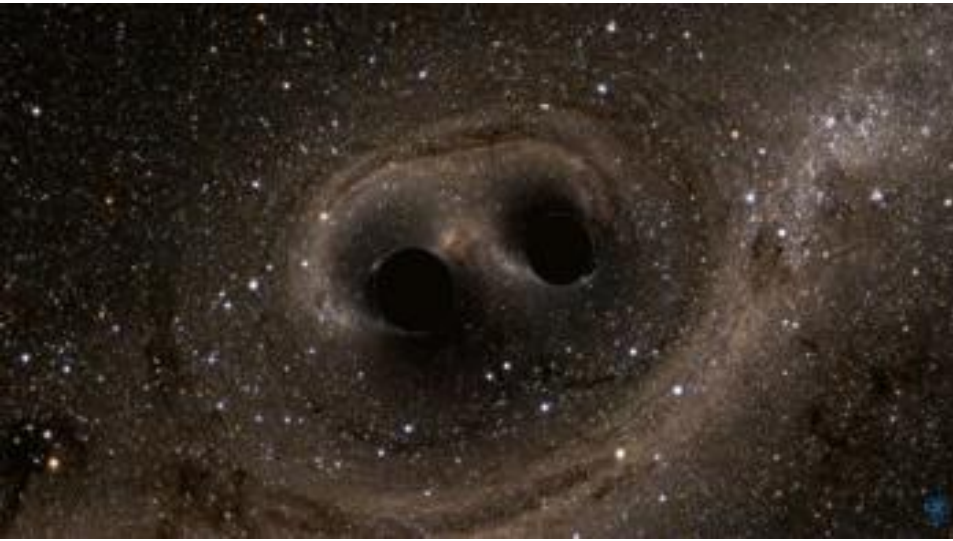
東京大学 大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター 准教授

Today



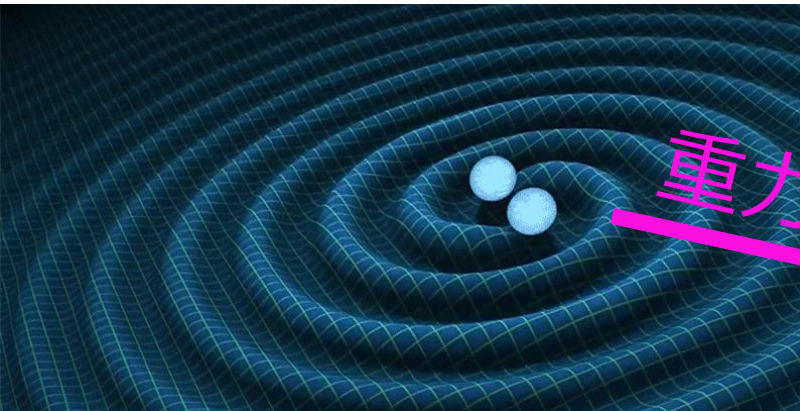
今回のお話

- レーザー干渉計による重力波観測の原理
- 重力波の初検出
- 重力波観測の現状
- 国際重力波観測ネットワーク
- 岐阜県神岡の重力波望遠鏡KAGRA
- 重力波観測の今後(次世代望遠鏡、宇宙望遠鏡)



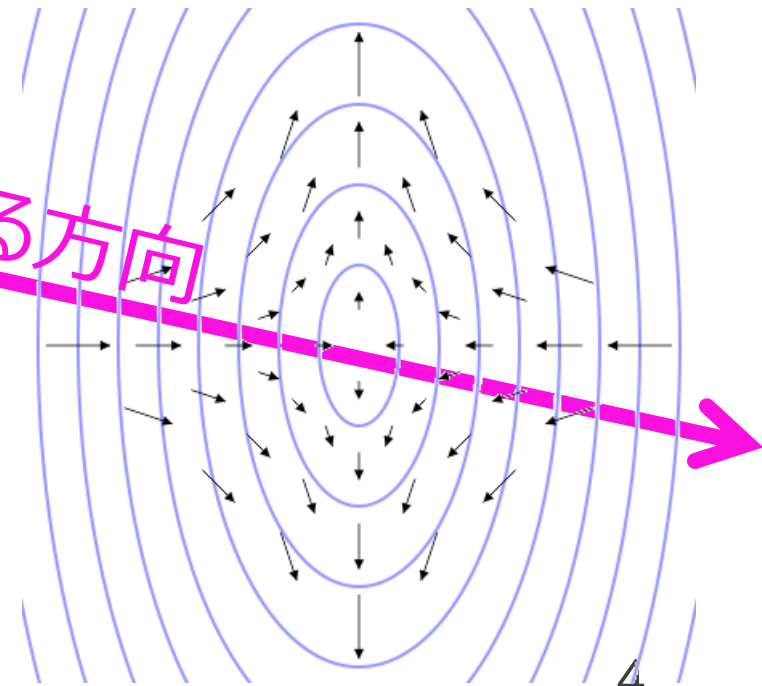
重力波とは？

- 光速で伝搬する時空のさざ波
- 物体の加速度運動で生じる
- 四重極放射、2つの偏極(+モードとxモード)
- 透過性が高い \leftrightarrow 相互作用が弱い



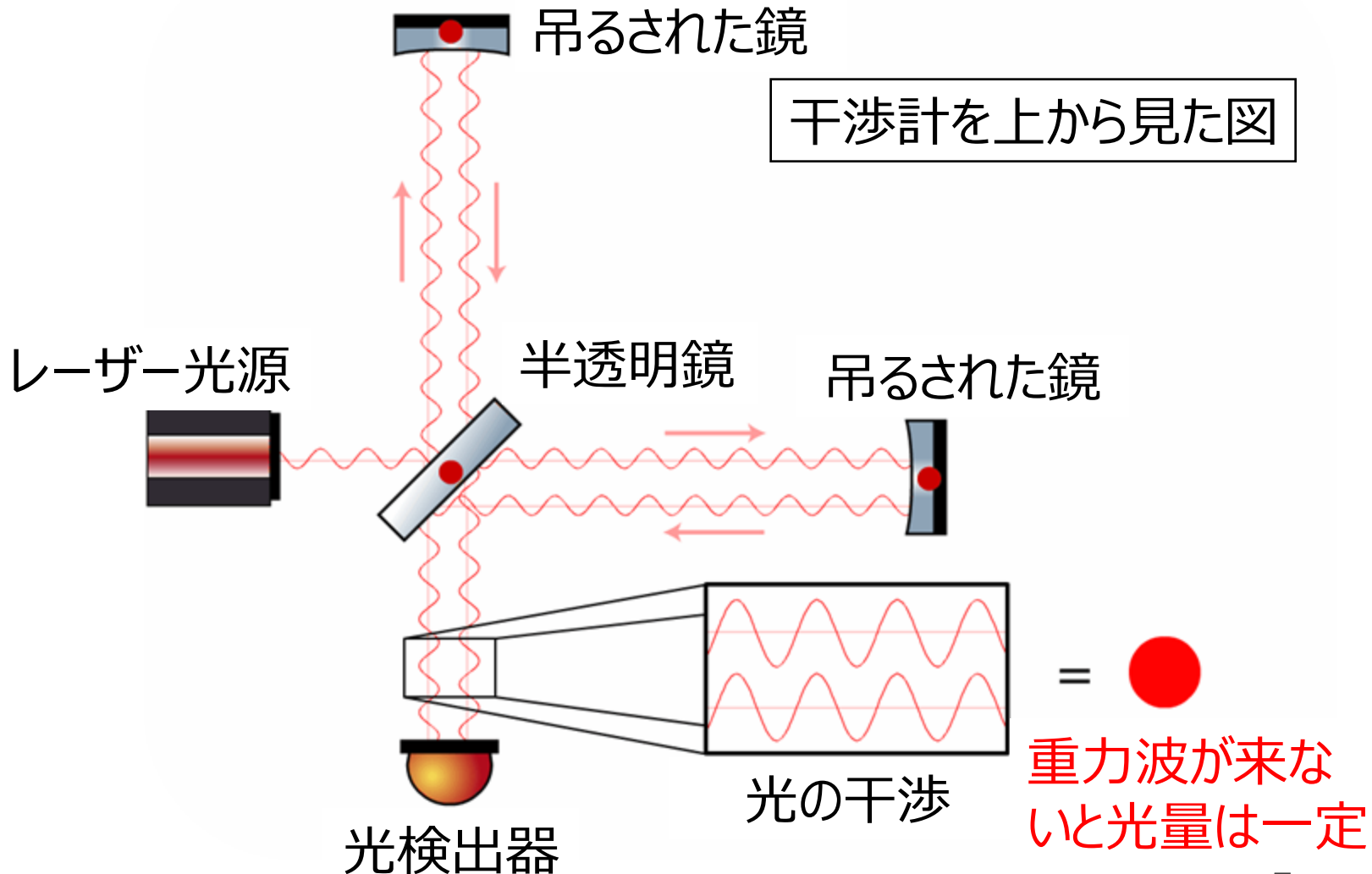
重力波の伝わる方向

- 質量と加速度が大きいほど大きな振幅の重力波



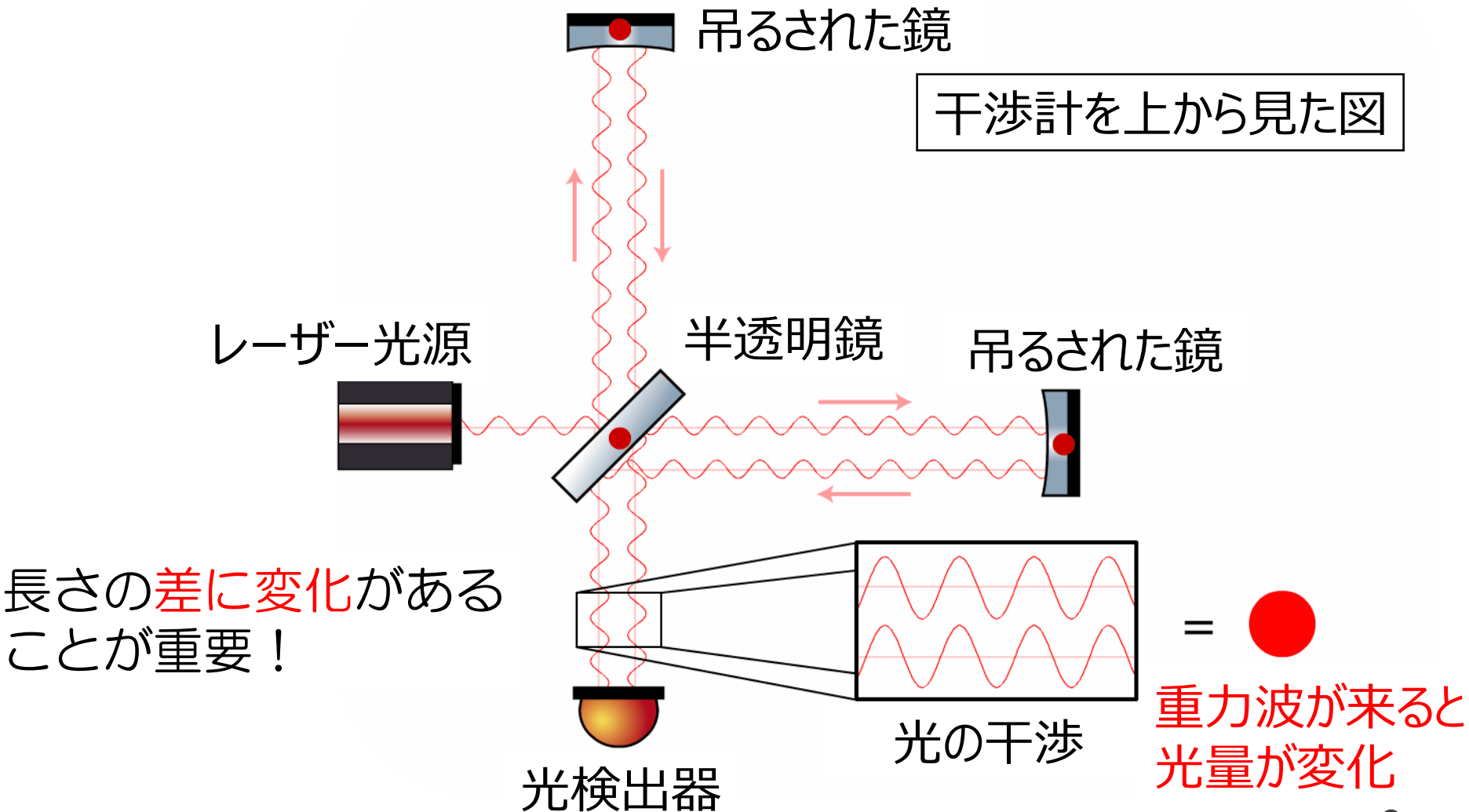
レーザー干渉計型重力波検出器

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



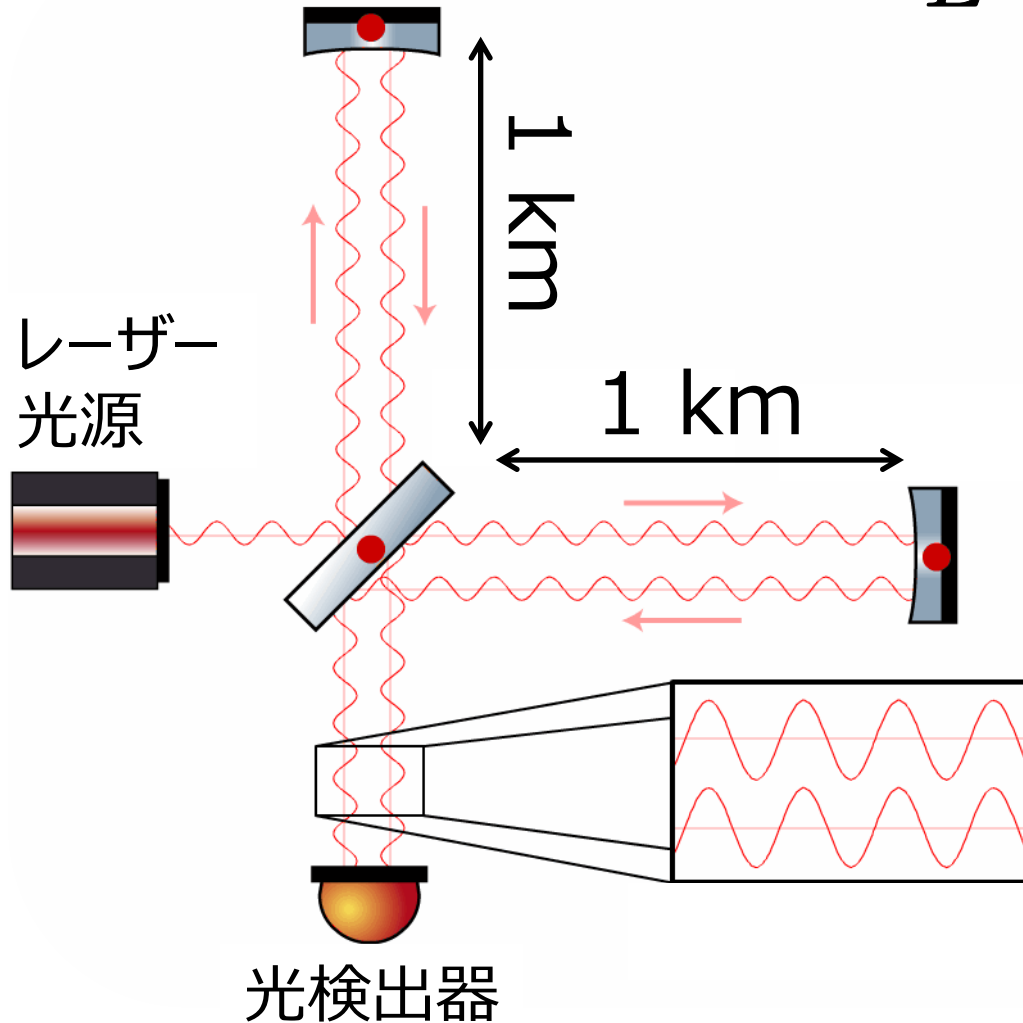
レーザー干渉計型重力波検出器

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



重力波の振幅はどれくらい？

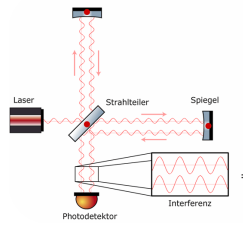
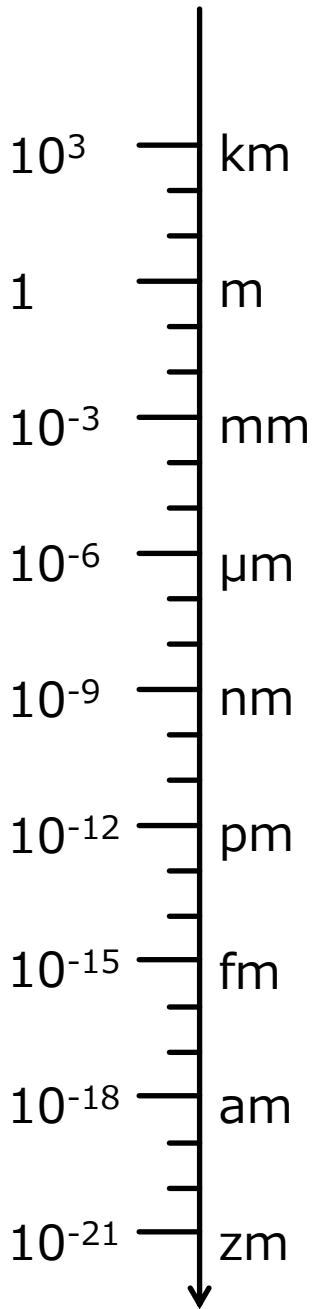
- 空間のひずみ量: $h = \frac{\delta L}{L} \sim 10^{-21}$



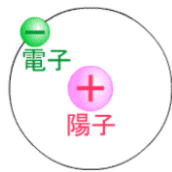
長いほど変化量は大きい
地上ではkm程度が限界

水素原子1個の
さらに1億分の1の変化
(10^{-18} m)
を測定しないといけない

様々な雑音との戦い

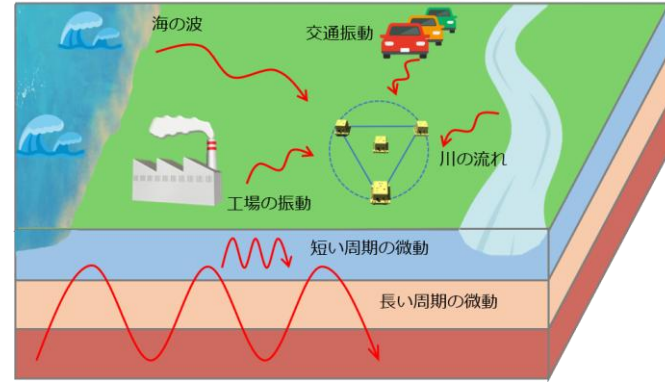


アメーバ $\sim 10^{-4}$ m

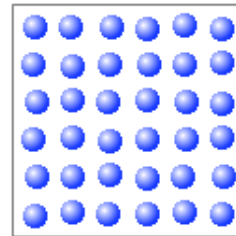


原子 $\sim 10^{-10}$ m

歪み
 10^{-21}



← 地面振動の大きさ
 $\sim 10^{-6}$ m



← 熱振動の大きさ
 $\sim 10^{-15}$ m

← レーザー干渉計の量子限界
 $\sim 10^{-20}$ m

目標感度

ハイゼンベルグの不確定性原理



重力波初検出までの歴史

- 1916年 アインシュタインが重力波を**予言**
- 1960年代 ヴァイスが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始
アメリカ、イタリア、日本、ドイツ
→ 重力波は**見つからず**
- 2005年 連星ブラックホール
の**重力波波形**が数値計算
できるようになってくる
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 LIGOが**初検出**

初検出を発表する
LIGO代表のライツィー



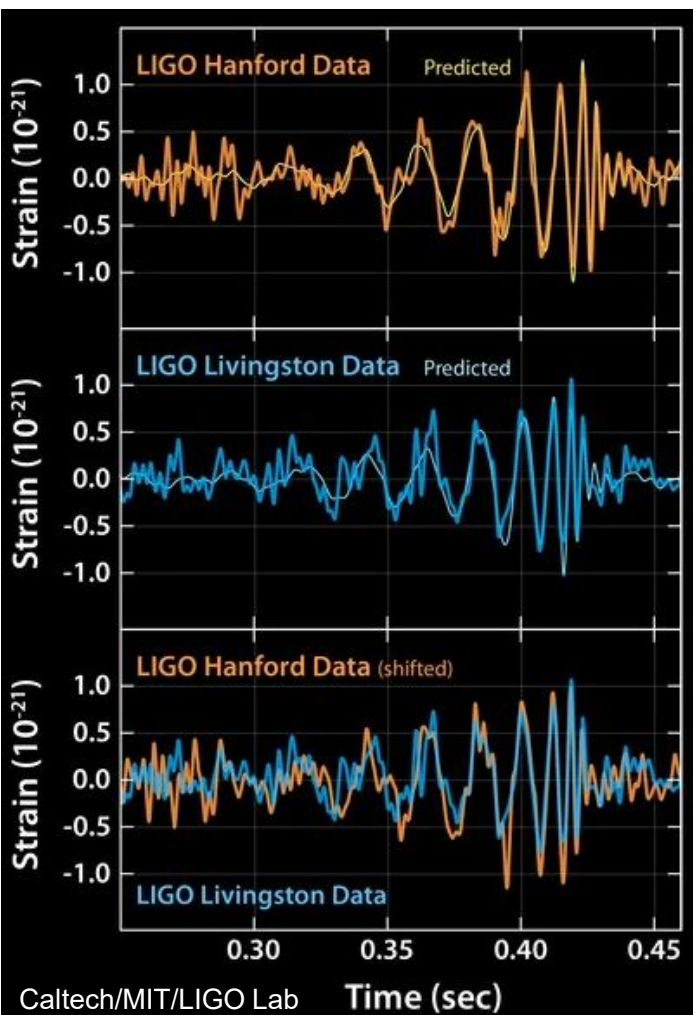
予言から100年

提案から50年

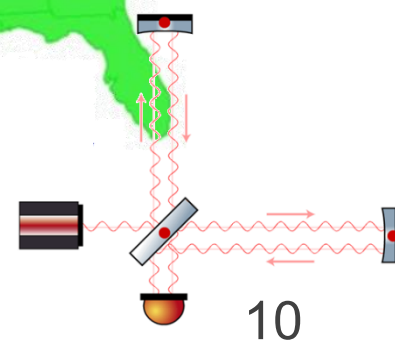
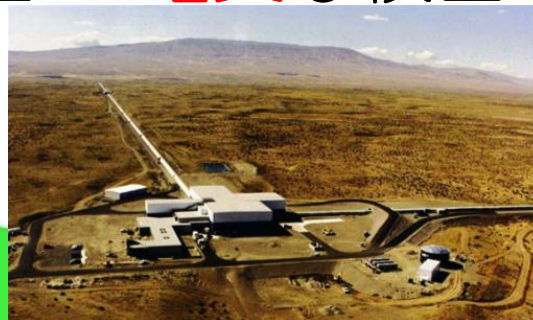
初検出論文の著者数は1004名

アメリカのLIGOによる初検出

- 2015年9月15日、3000 km離れた2台の望遠鏡で
ほぼ同時に同じ波形を検出 → **確実な**検出



ハンフォード
観測所

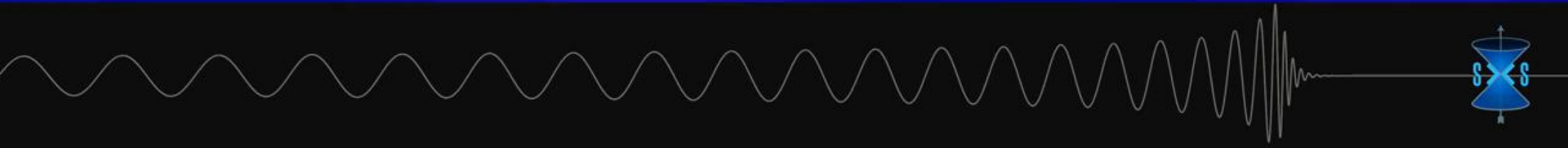
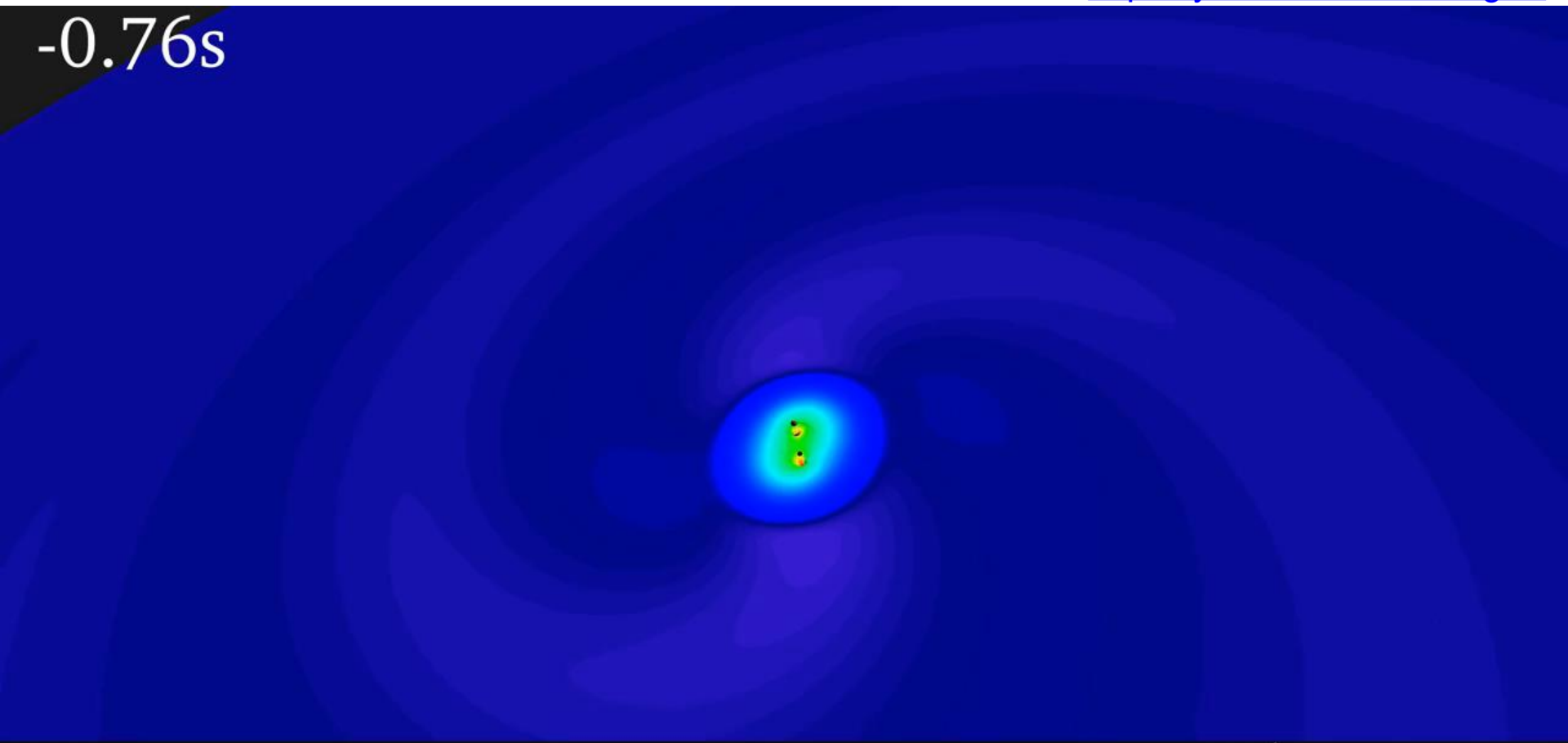


連星ブラックホール合体

- 2つのブラックホールが1つのブラックホールに

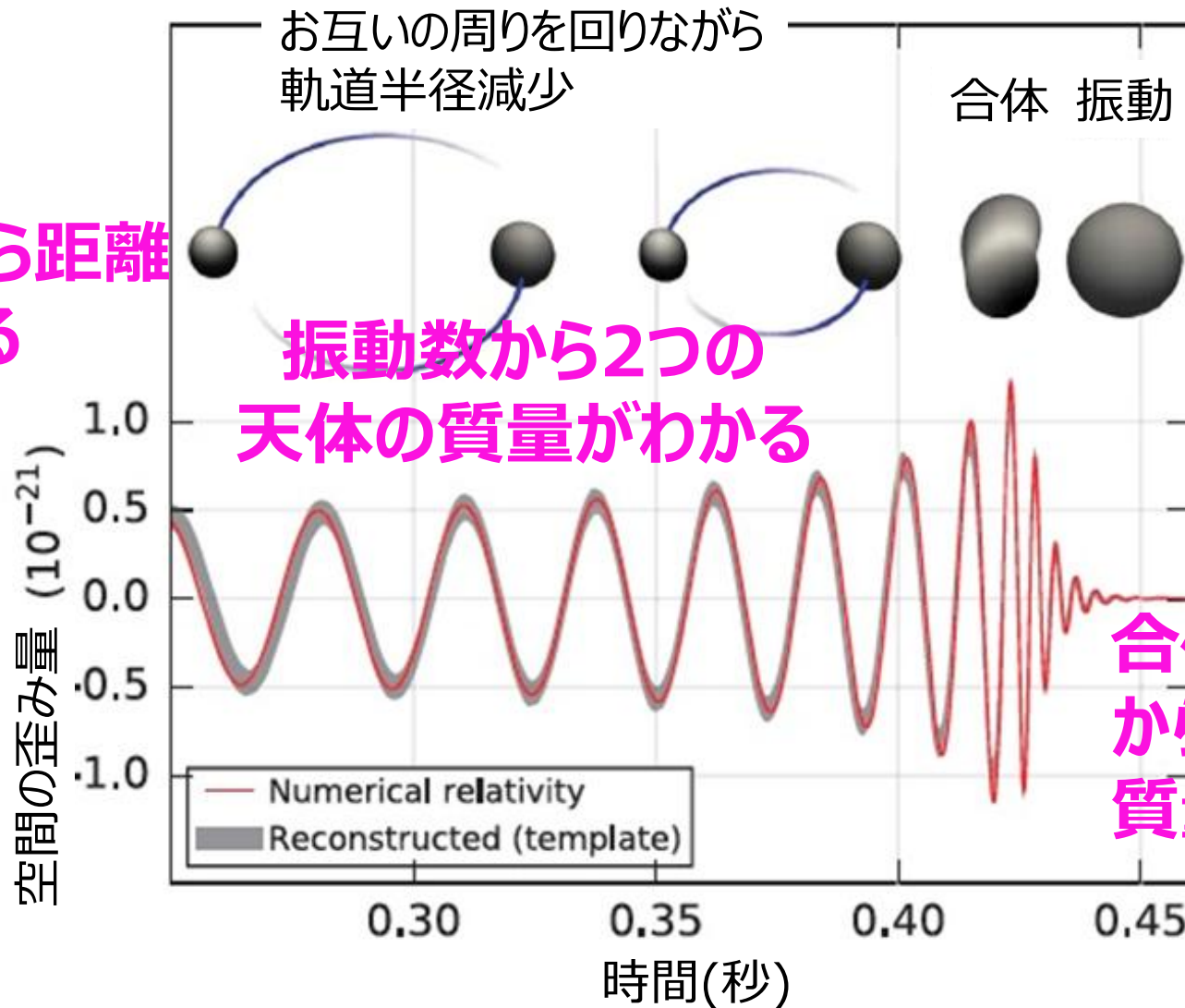
<https://youtu.be/c-2XluNFgD0>

-0.76s



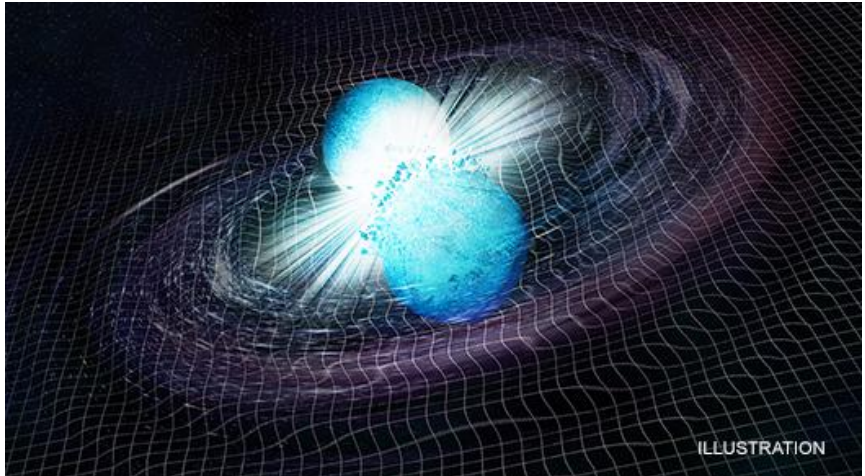
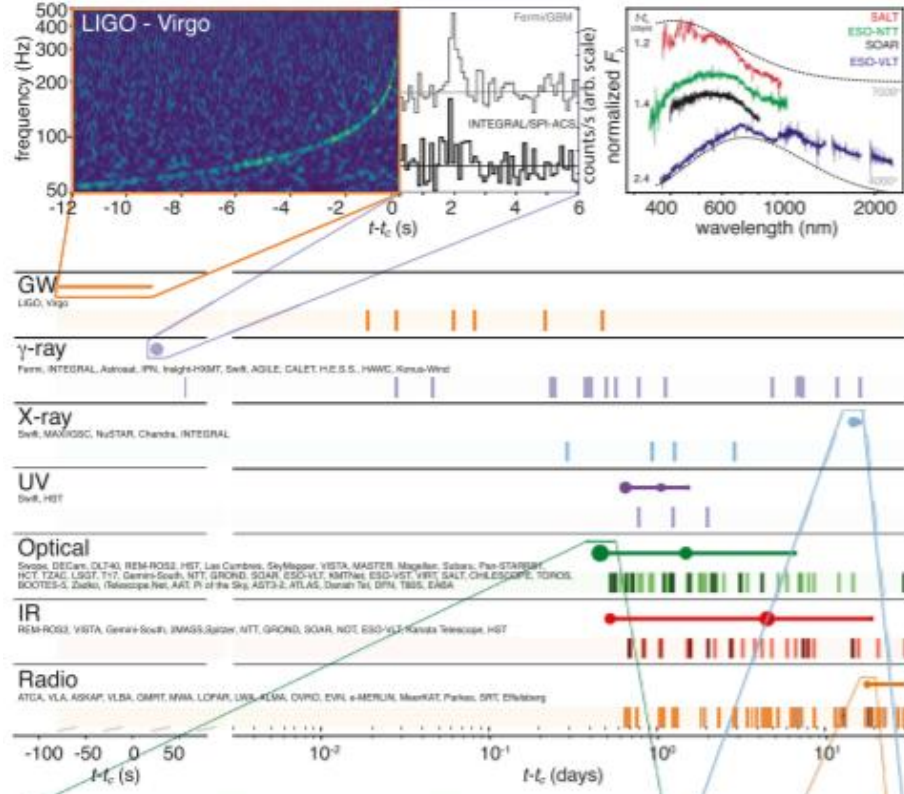
重力波形から距離と質量がわかる

- 約36太陽質量+約29太陽質量 → 約62太陽質量

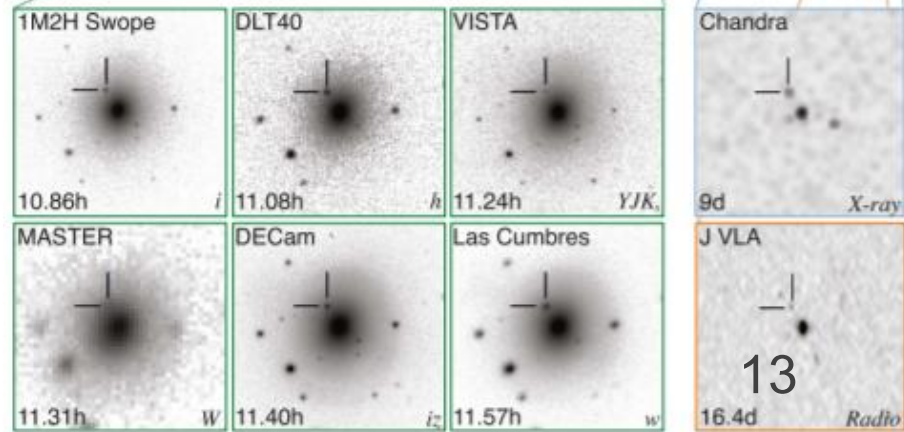


連星中性子星合体からの重力波

- 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
電磁波の波長で観測
- マルチメッセンジャー
天文学の幕開け



[ApJL, 848:L12, \(2017\)](https://doi.org/10.1088/1538-3801/134/12/121001)



連星中性子星合体

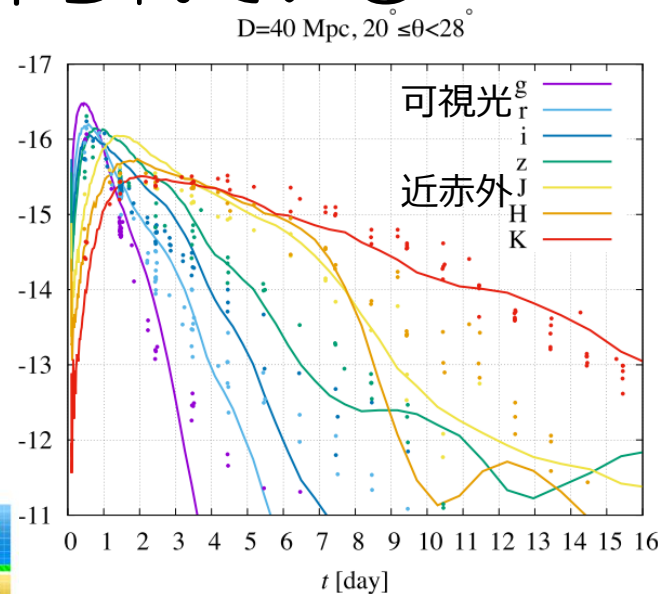
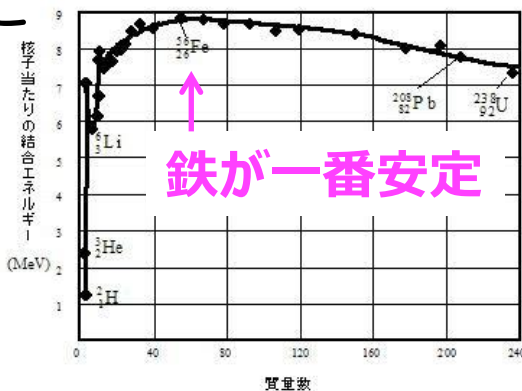
- 重力波のあと、ガンマ線を放出

<https://youtu.be/e7LcmWiclOs>

連星中性子星合体と重元素合成

- 合体後の光り方から、**重元素**が作られていることがわかった

ビッグバンで作られる



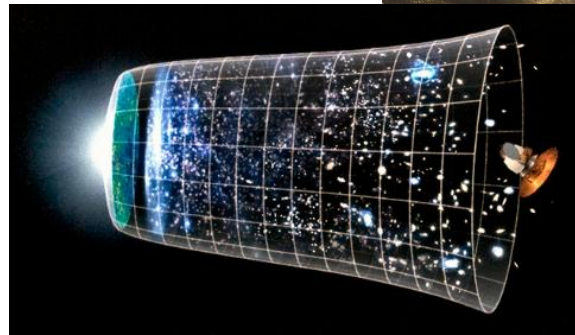
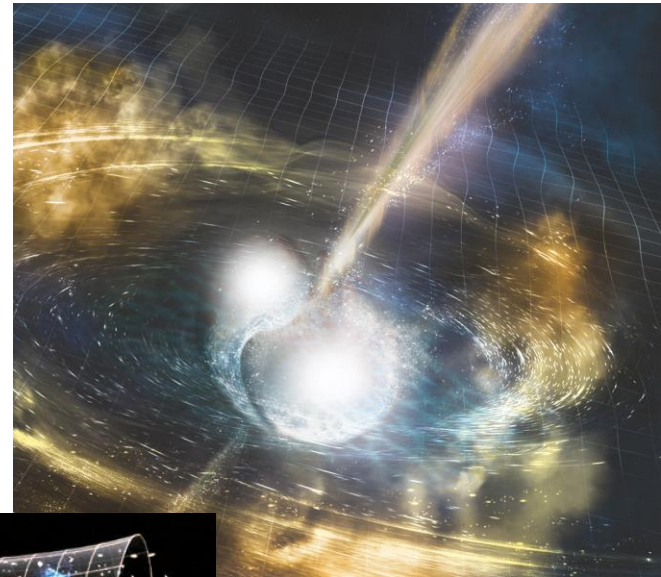
K. Kawaguchi+,
[ApJL 865, L21 \(2018\)](#)

← 連星中性子星合体で作られる

H	He																	He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne											Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

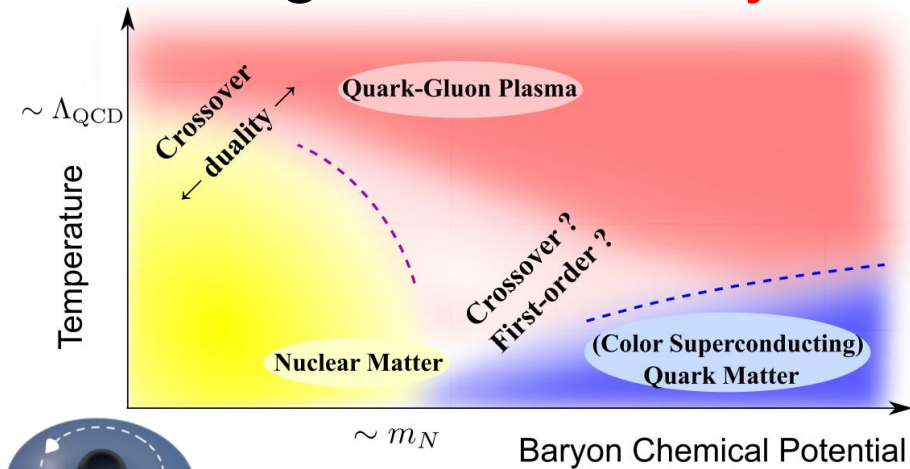
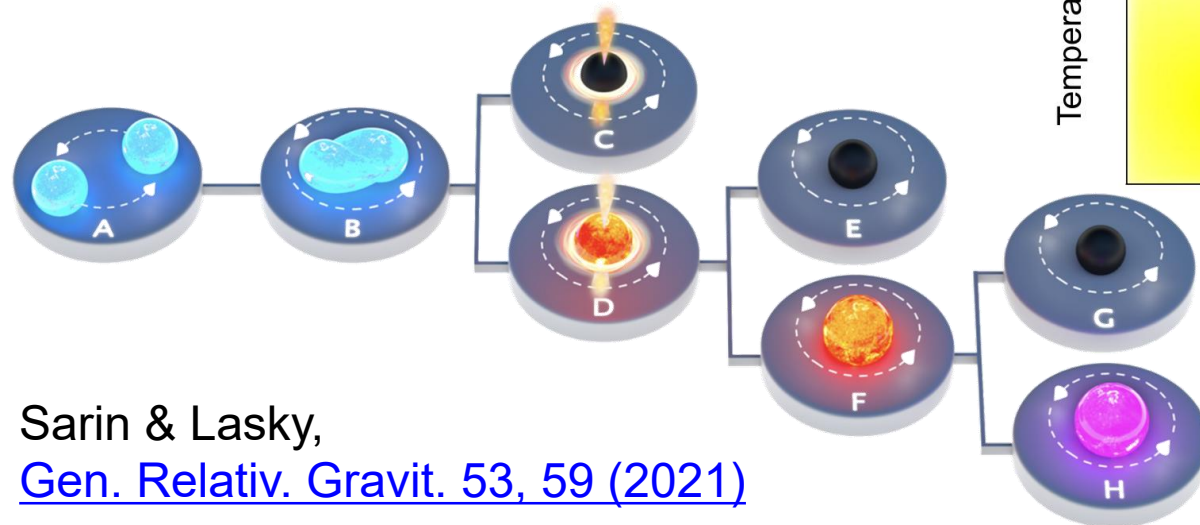
連星中性子星合体からわかったこと

- 連星中性子星合体で**ガンマ線バースト**が起こる
長年の謎であったショートガンマ線バーストの起源
- 連星中性子星合体で**重元素**が合成される
全てを説明できるか？ 超新星爆発も寄与？
- 重力波と光の**速度**は等しい
1.3億光年の距離を1.7秒の差
修正重力理論に大きな制限
- **宇宙膨張**の速さ
(ハッブル定数)を測定
他の測定方法と無矛盾
→ これまでに1例のみ
複数例の観測が必要



まだわかっていないこと

- What happened **after the merger**?
- What are the progenitors of **GRBs** and **kilonovae**?
 - Short/long GRBs explained by BNS?
 - Diversity of kilonovae? c.f. GRB211211A, GRB230307A
- Can BNS mergers explain the origin of all **heavy elements**?
- QCD **phase transition**?

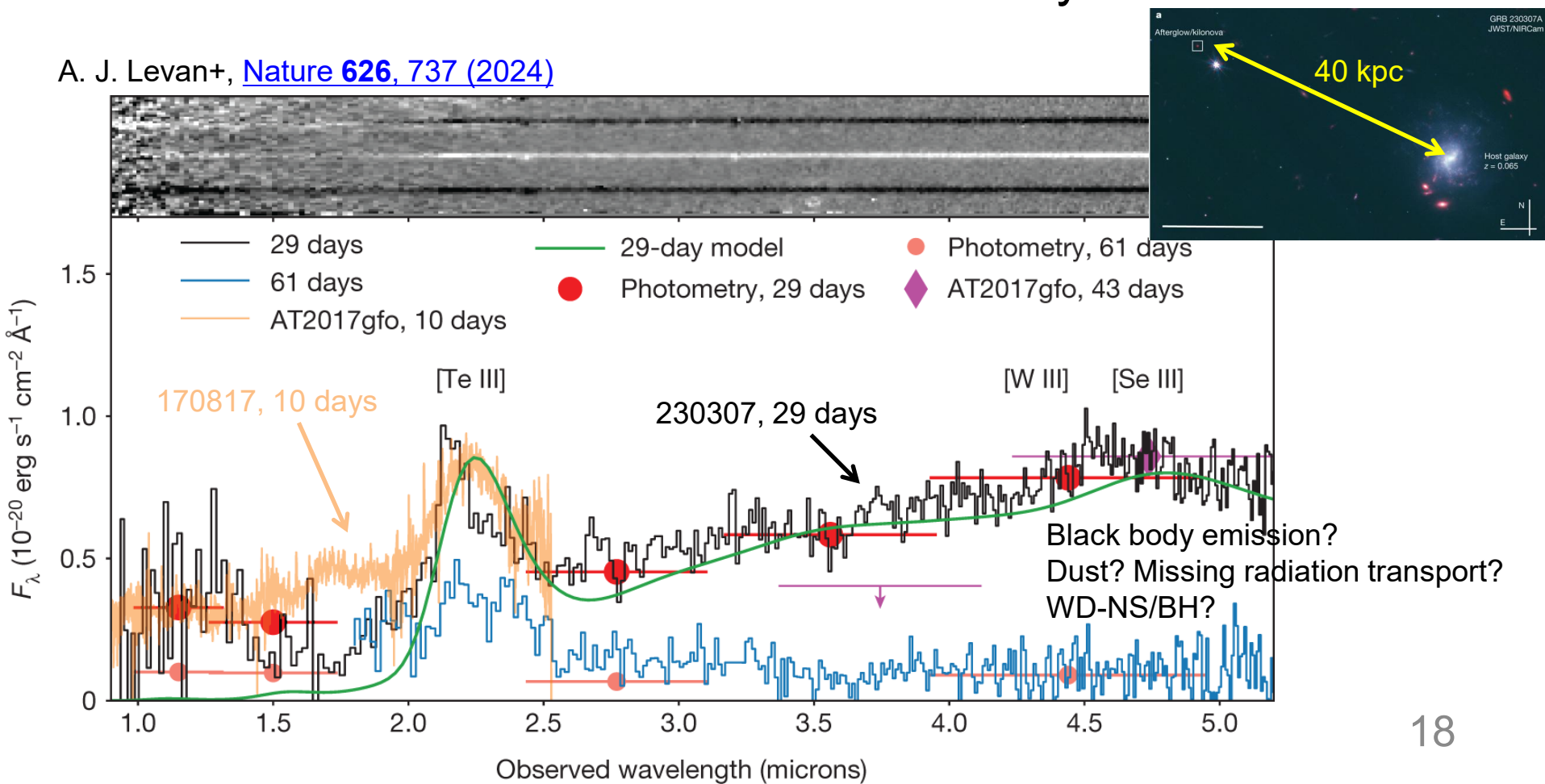


Fujimoto+,
[PRL 130, 091404 \(2023\)](https://arxiv.org/abs/2212.03411)

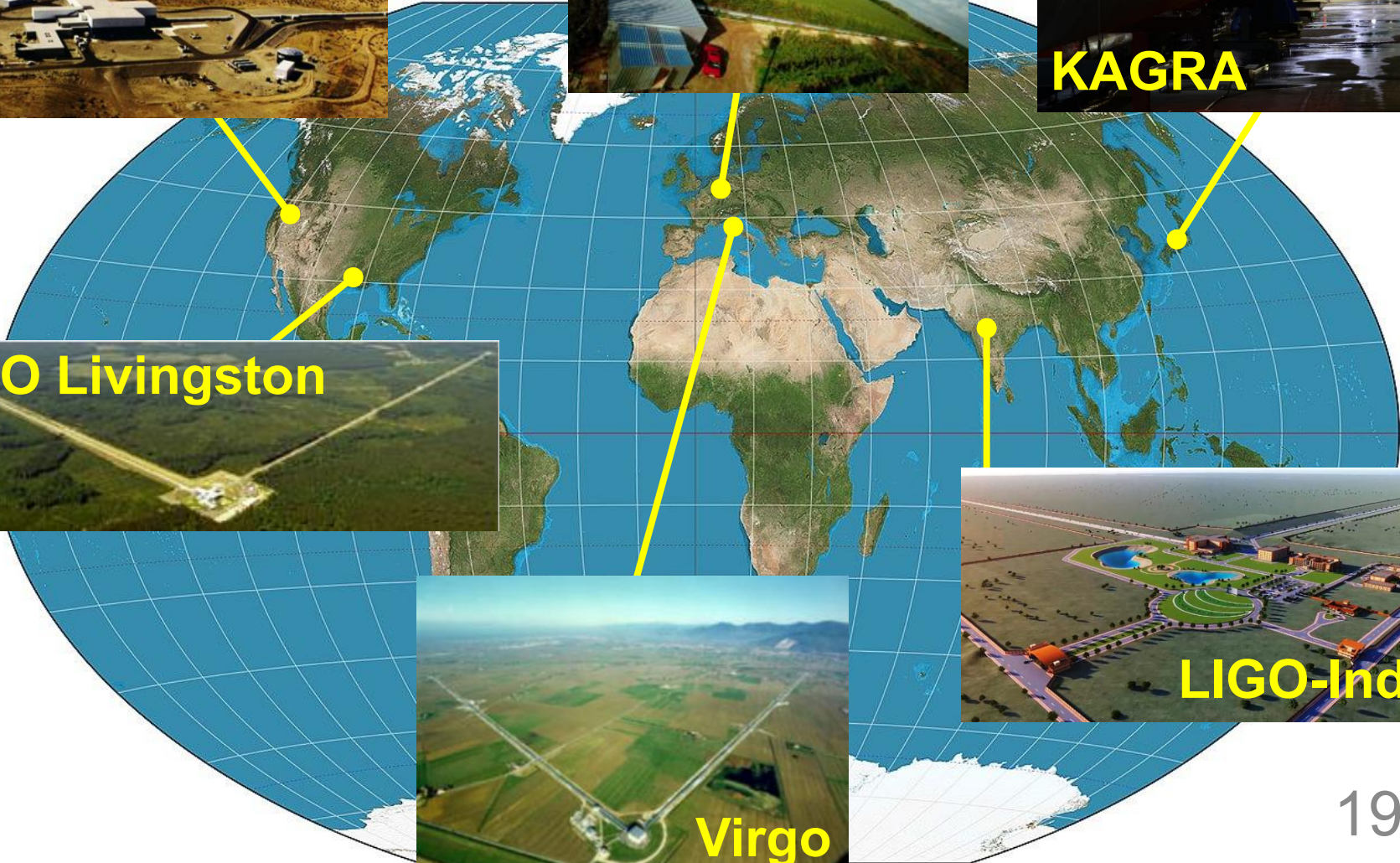
GRB230307A Excess

- Not collapsar due to large offset (~ 40 kpc) from host galaxy
- Likely BNS merger but long GRB (~ 35 sec)
- Similar kilonova to 170817 but extremely red

A. J. Levan+, [Nature 626, 737 \(2024\)](#)

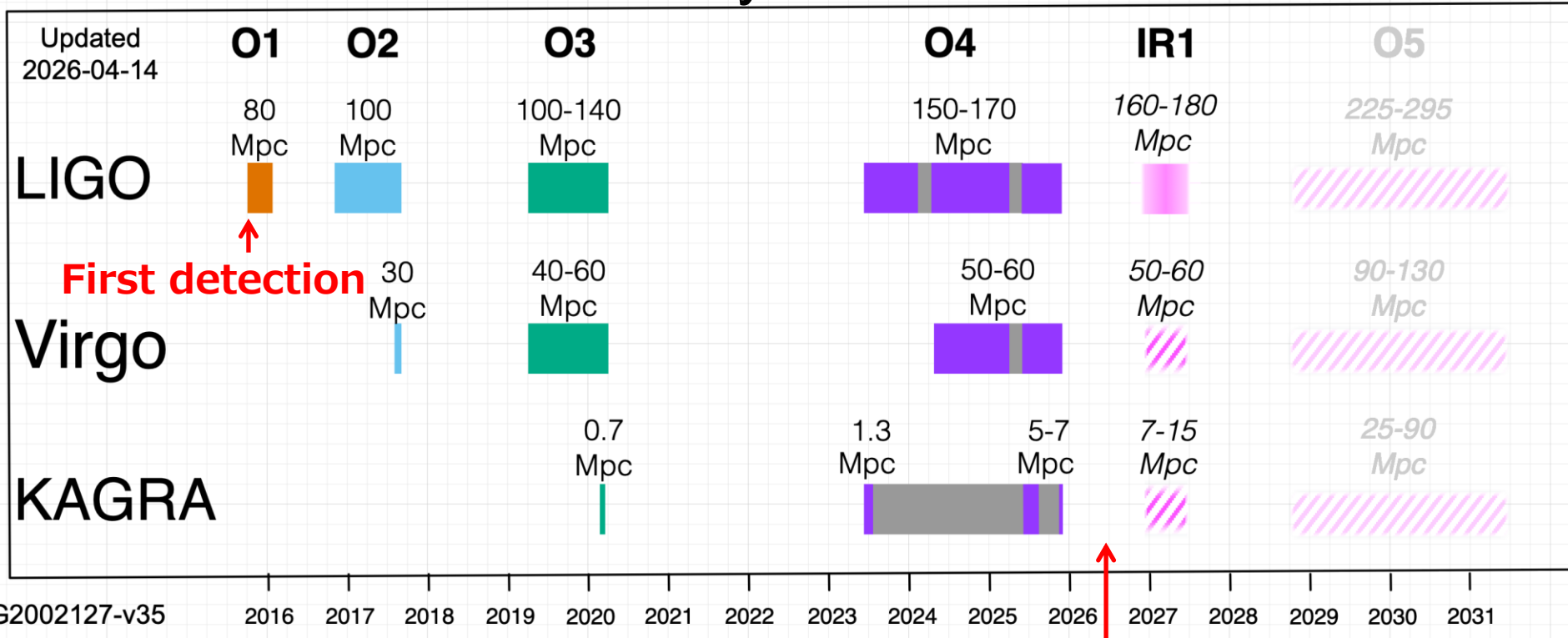


国際重力波観測ネットワーク



LIGO-Virgo-KAGRA Observations

- **Coordinated runs** to detect GW signals by multiple detectors for better sky localization etc.



Today: Upgrading for IR1

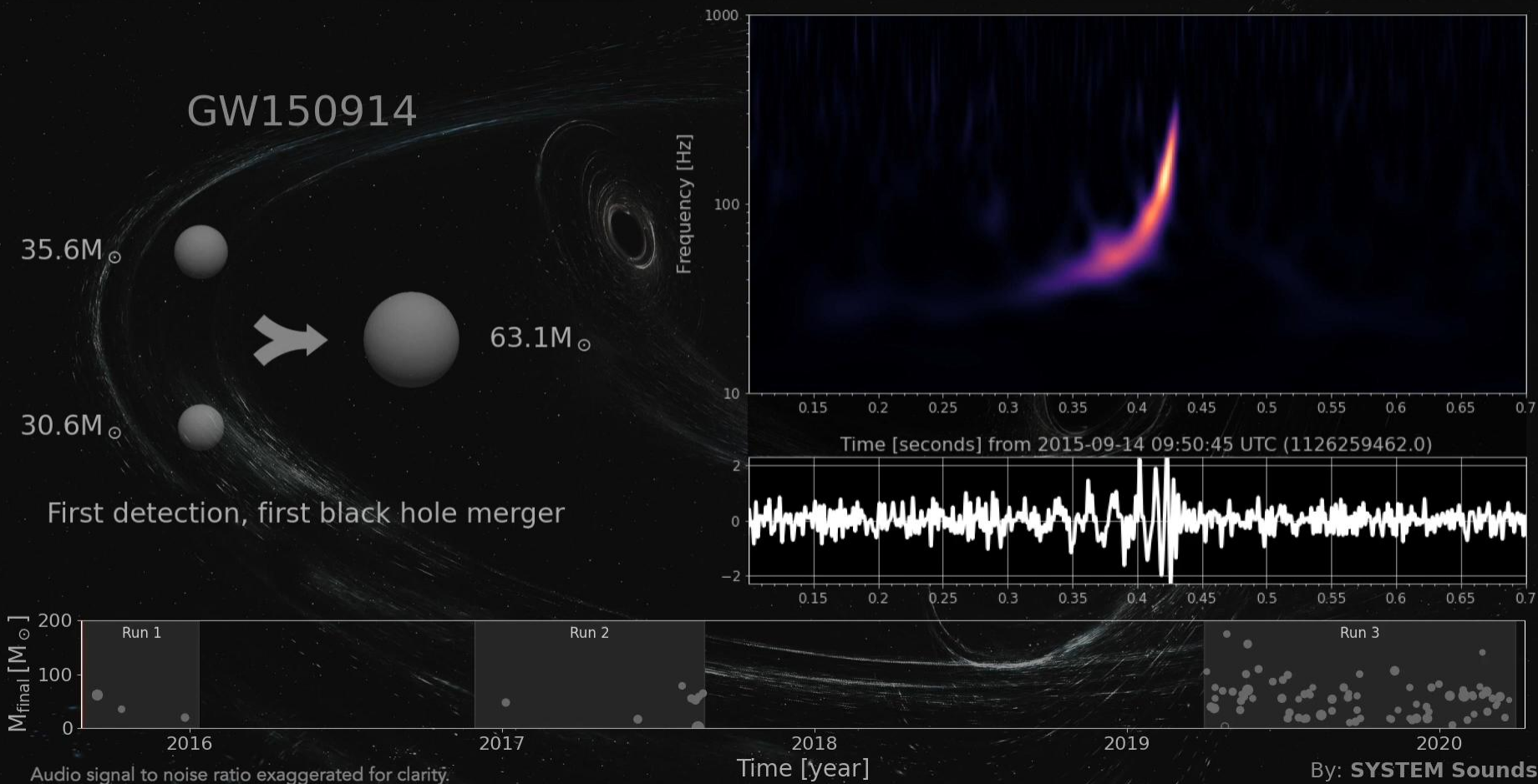
<https://observing.docs.ligo.org/plan/>



Sound from Binary Coalescences

- Louder if closer, tone is higher if mass is lighter

SOUND OF GRAVITATIONAL WAVES

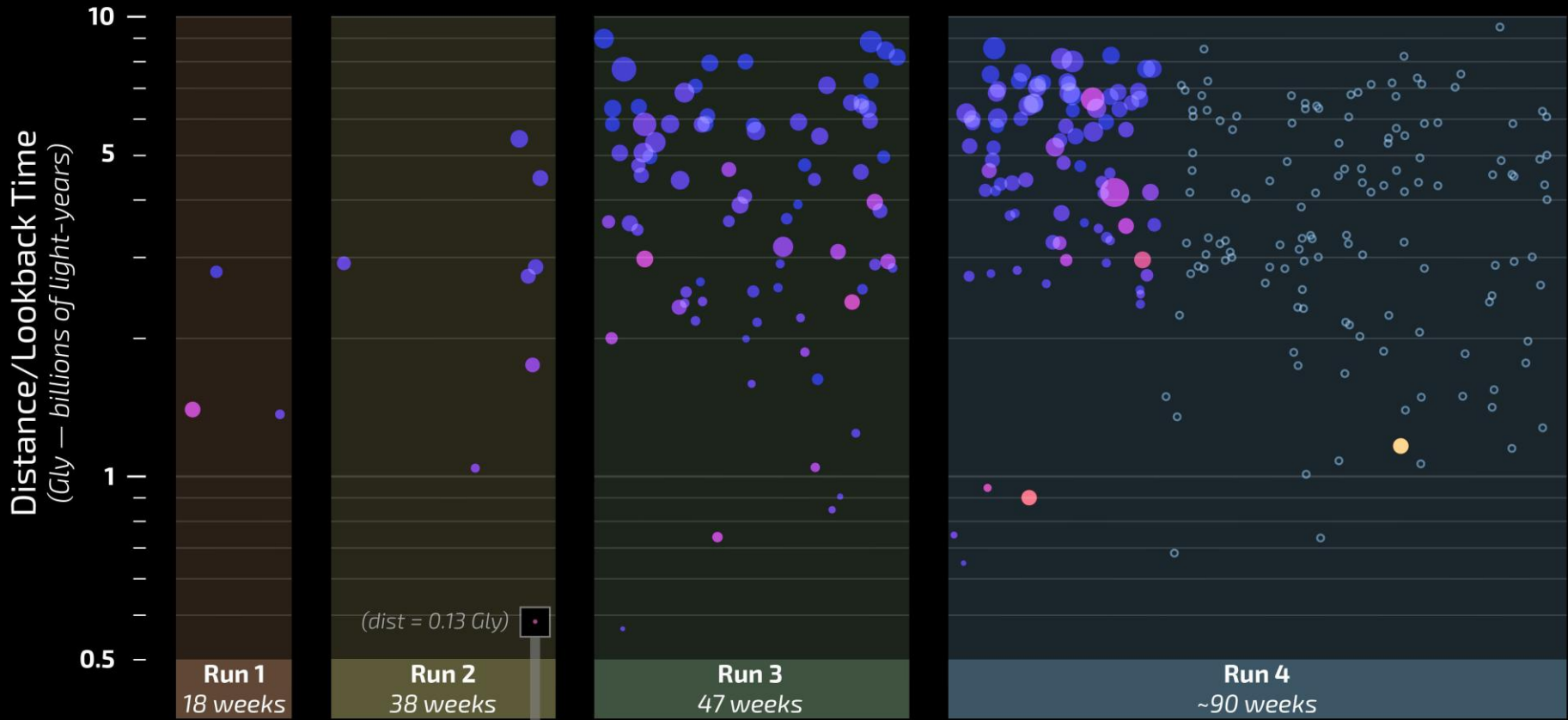


Further and Clearer

- 300+ events with increased detector sensitivity

10 Years of LVK Black Hole* Mergers

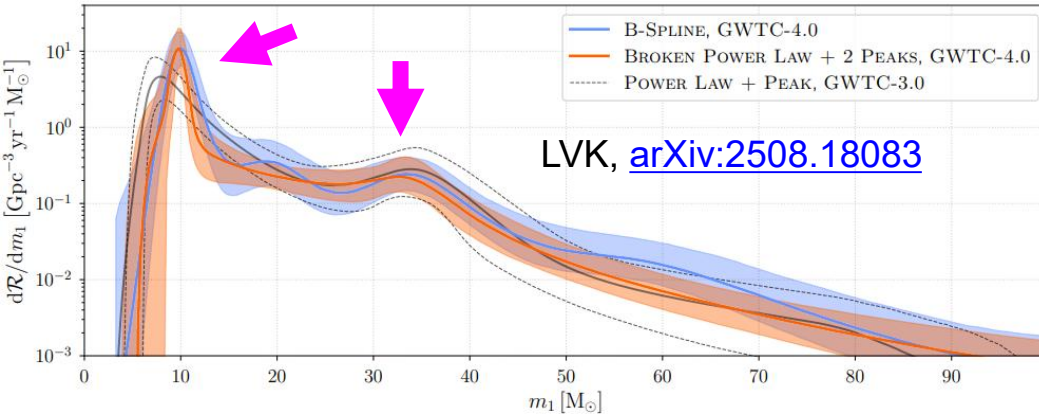
*plus several neutron stars!



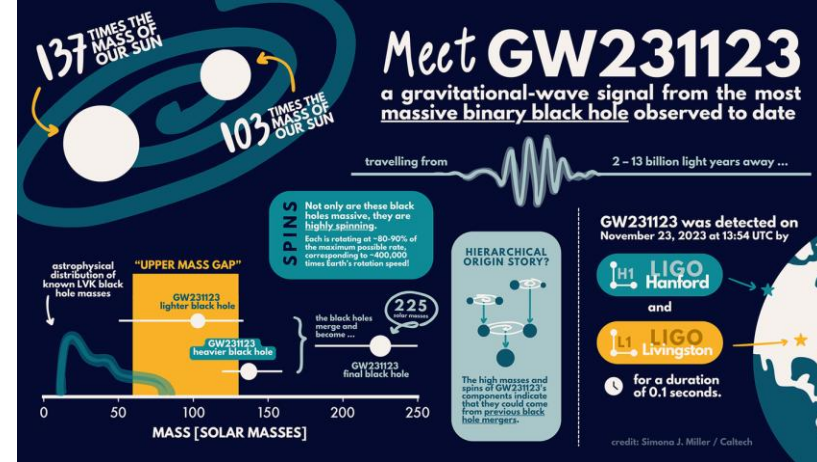
Timespans of Science Runs (2015-2025)

Some of Highlights

Population studies

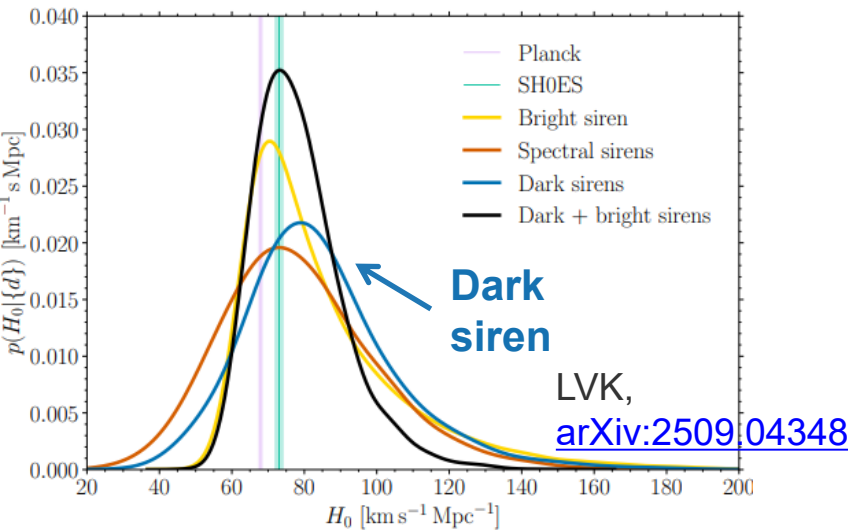


IMBH events

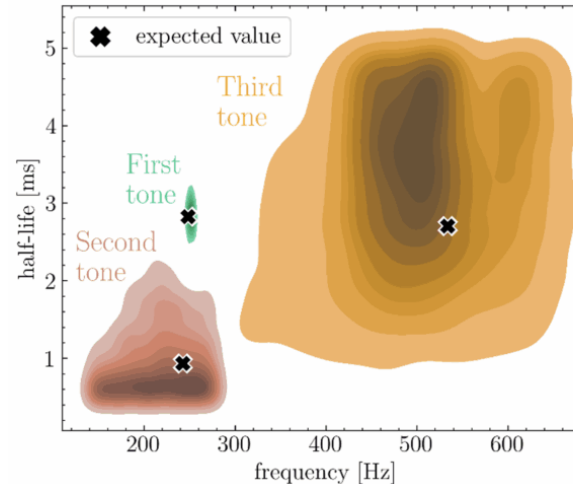


LVK, [ApJL 993 L25 \(2025\)](https://doi.org/10.3847/15384357/2025001)

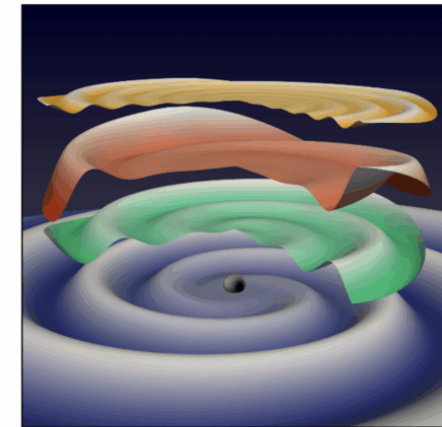
Cosmic expansion measurements



Tests of General Relativity

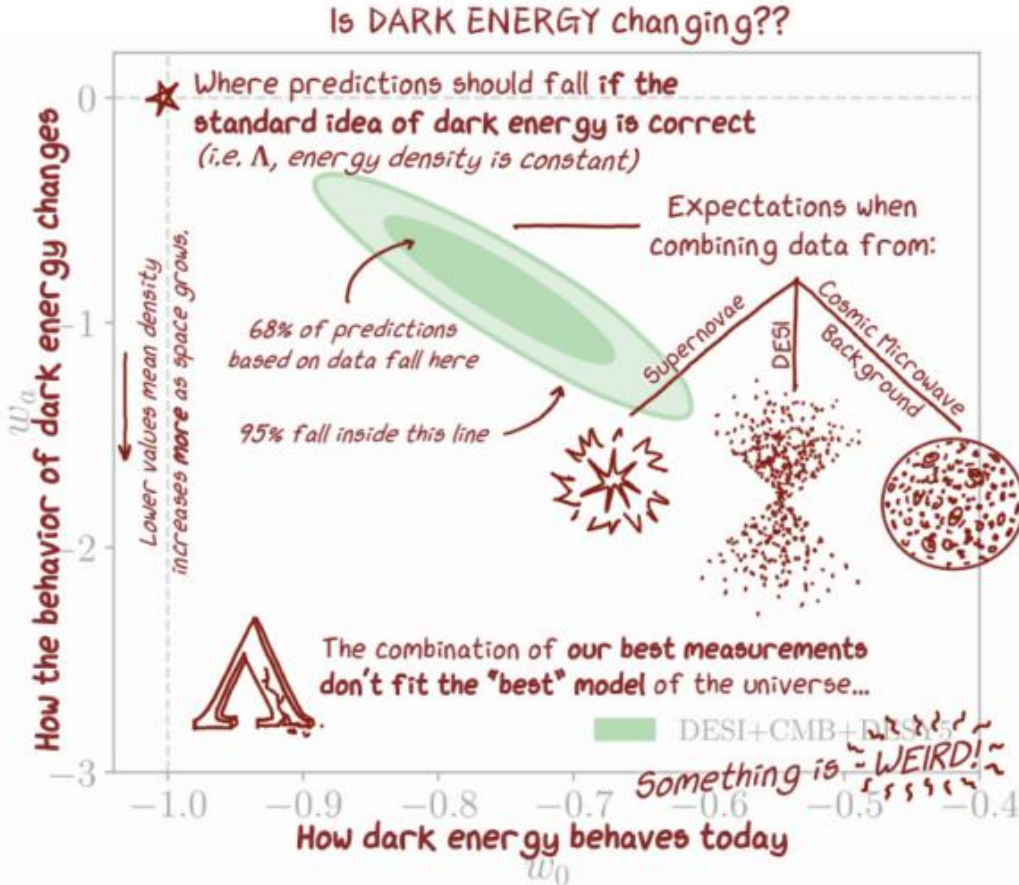
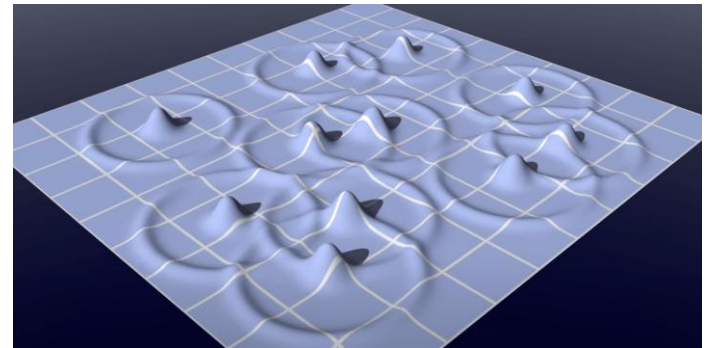


LVK, [PRL 135, 111403 \(2025\)](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.135.111403)



DESIによる宇宙膨張測定

- Dark Energy Spectroscopic Instrument Data Release 2
 - 4 m optical telescope in Arizona DESI, [PRD 112, 083515 \(2025\)](#)
- Baryon acoustic oscillation measurements from more than 14 million galaxies and quasars



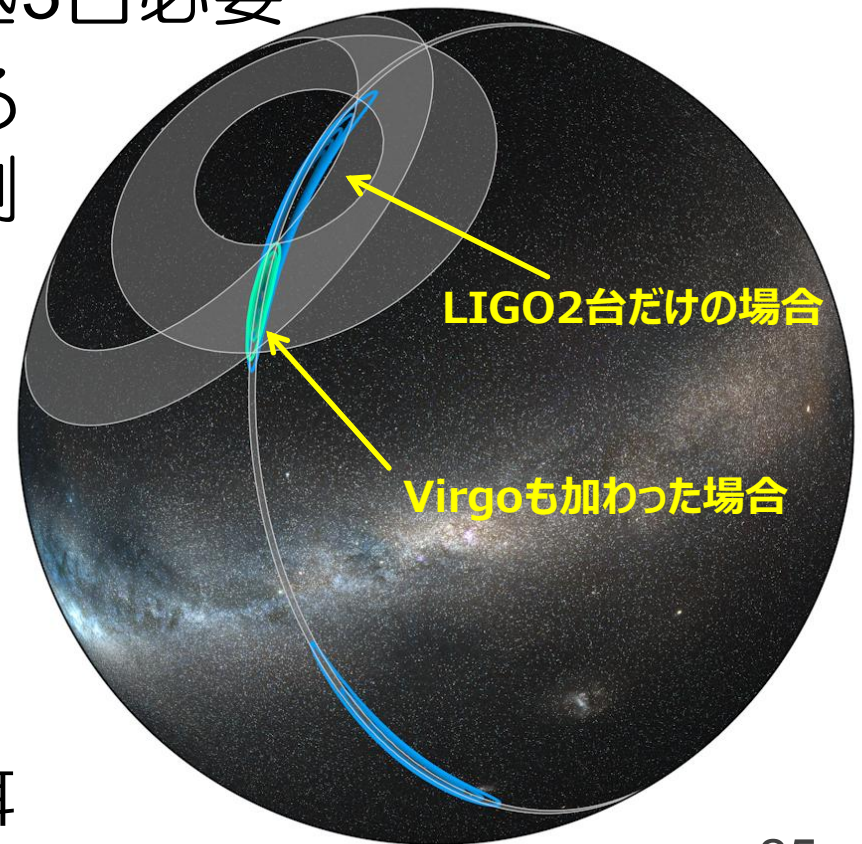
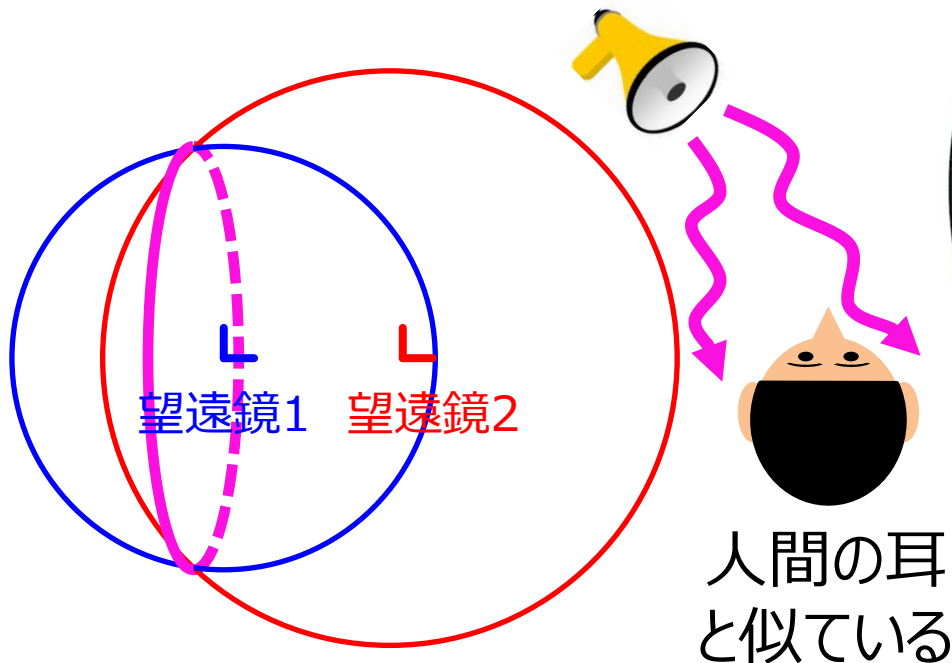
$$w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

\uparrow \uparrow z
 -1 0 $1+z$
 is Λ CDM 2.8-4.2 σ tension

宇宙「定数」ではない?
 Λ CDMの破れ?

なぜ複数台が必要か？

- 1台だと他の雑音と区別をつけにくい
- 稼働率、全天カバー率の向上
- 波源の**方向決定**には最低3台必要
- 一般相対性理論を超える重力波**偏極モード**の観測



大型低温重力波望遠鏡KAGRA

- 2010年にプロジェクトスタート
- 愛称: かぐら(神岡 + gravitational wave)
- 岐阜県の神岡鉱山**地下**に建設
- **地下建設と低温が大きな特徴**
- 14ヶ国、~130研究機関、~420名



プロジェクト代表:
梶田隆章

KAGRA



2024年12月の
コラボレーション会議

KAGRAの行き方



東京から新幹線で最速2時間5分



富山駅から
電車+バスで約2時間
(車で約1時間)

神岡の風景

2024年12月



2015年6月



東京大学国際高等研究所
カブリ数物連携宇宙研究機構
神岡分室

東北大学
ニュートリノ科学
研究センター
茂住実験室

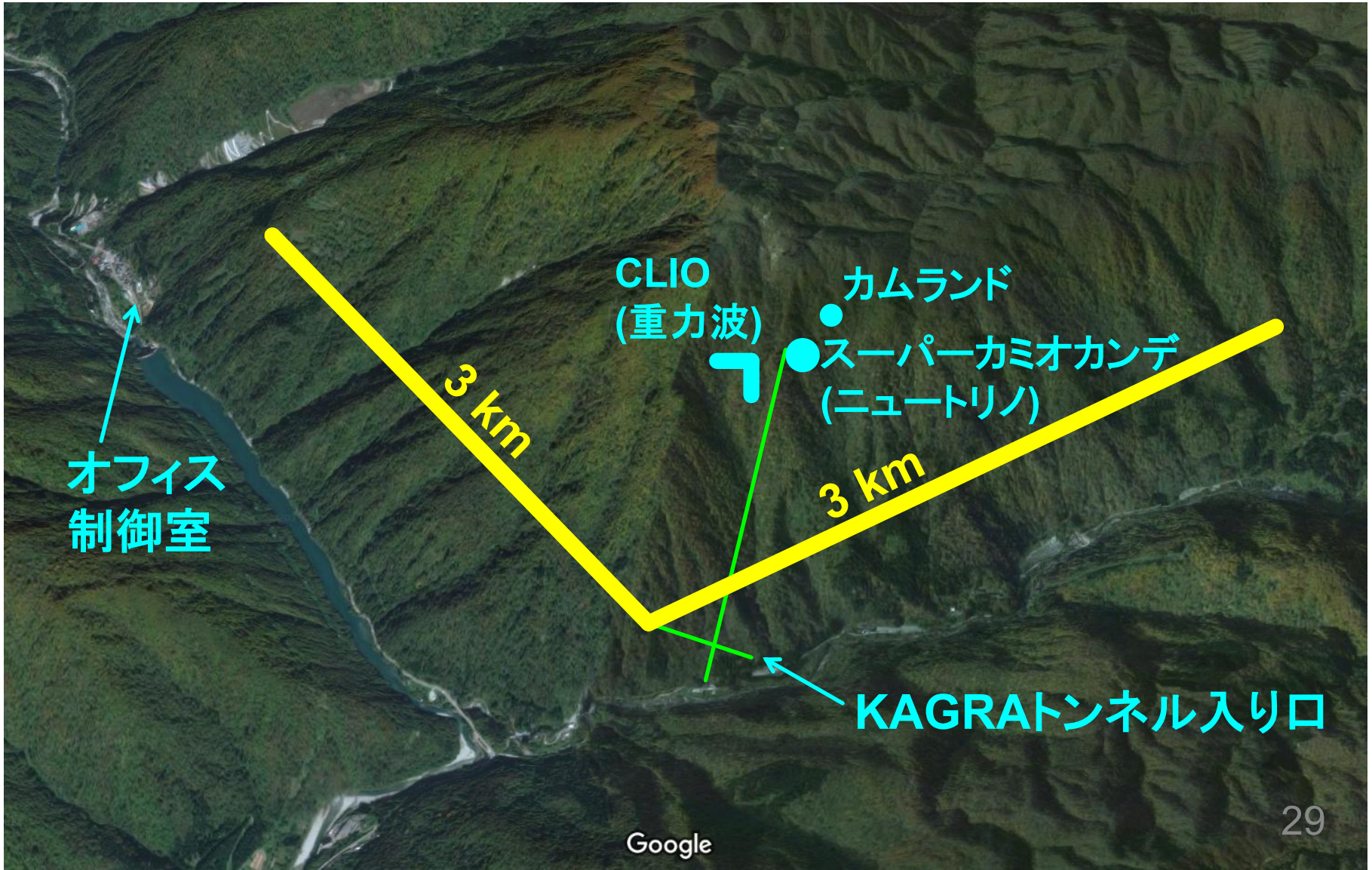
東京大学宇宙線研究所
附属神岡宇宙素粒子研究施設

東京大学宇宙線研究所
重力波観測研究施設

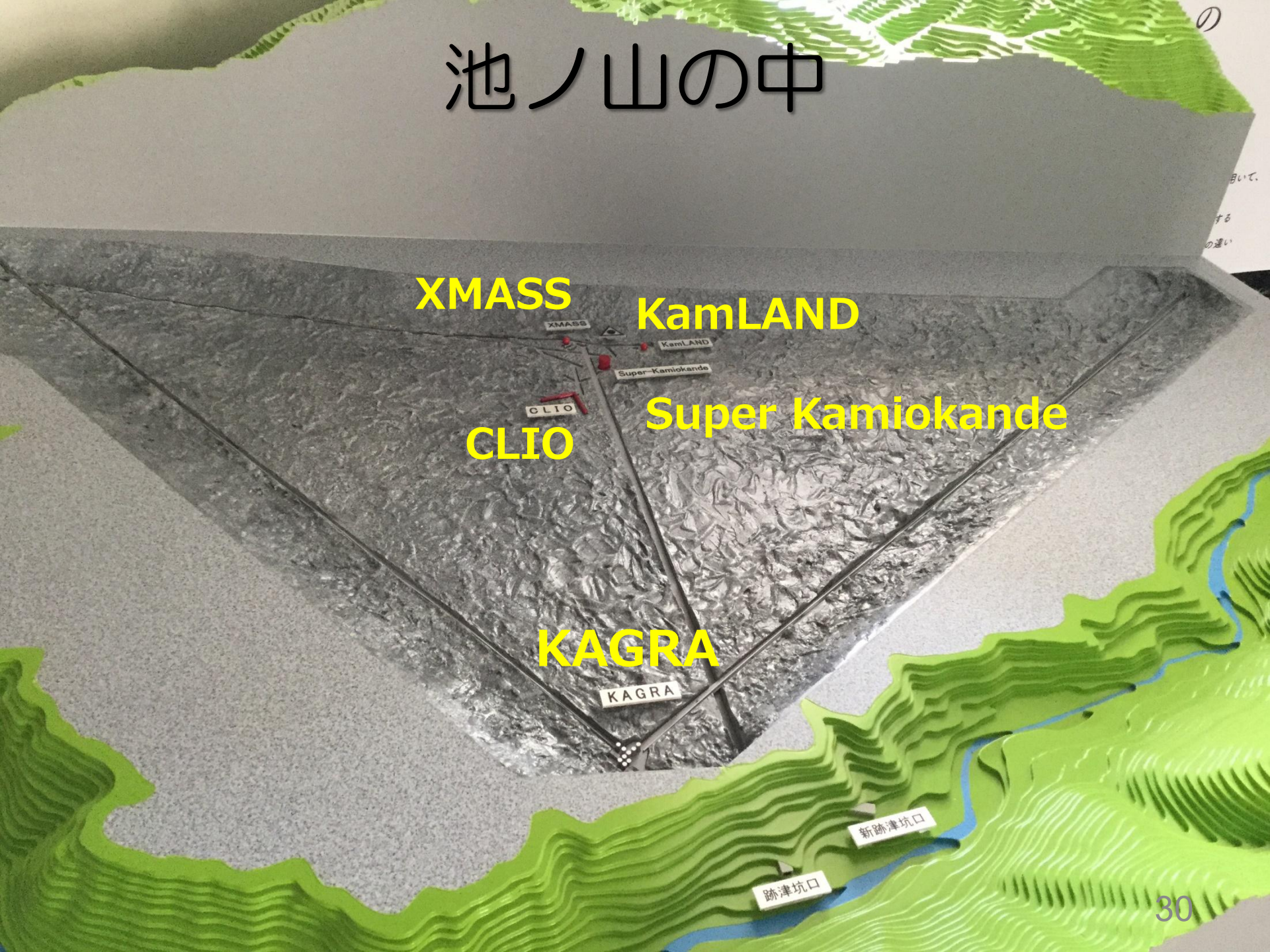


KAGRAの所在地

- 岐阜県飛騨市 池ノ山の中にある



池ノ山の中



XMASS

KamLAND

CLIO

Super Kamiokande

KAGRA

跡津坑口

新跡津坑口

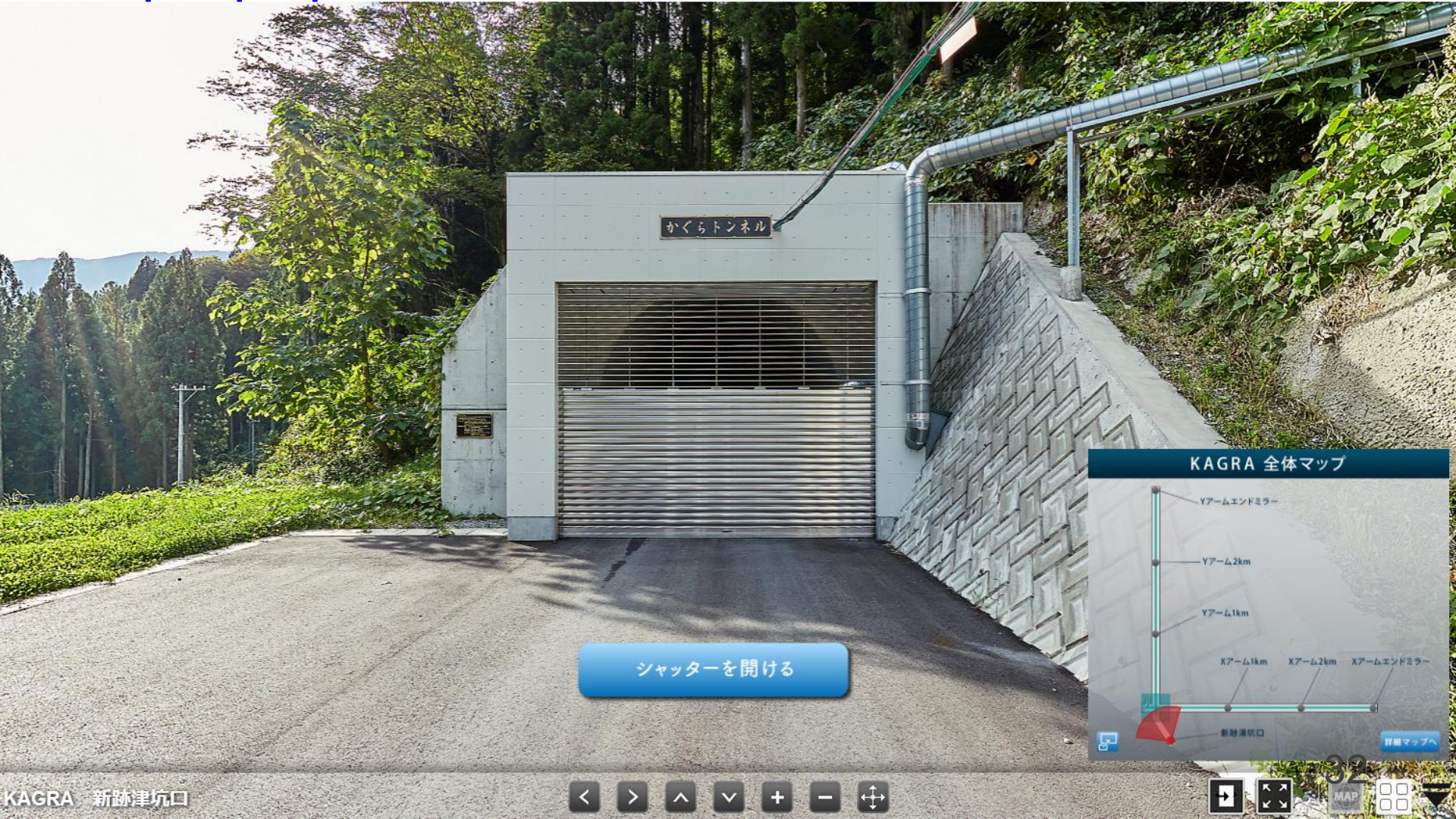
かぐらトンネル

- 2本の3km真空パイプの中をレーザー光が往復



宇宙線研究所VR

- <https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/prwps/panorama/KAGRA/>



地下での作業

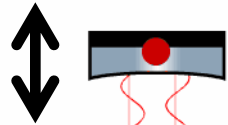
- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



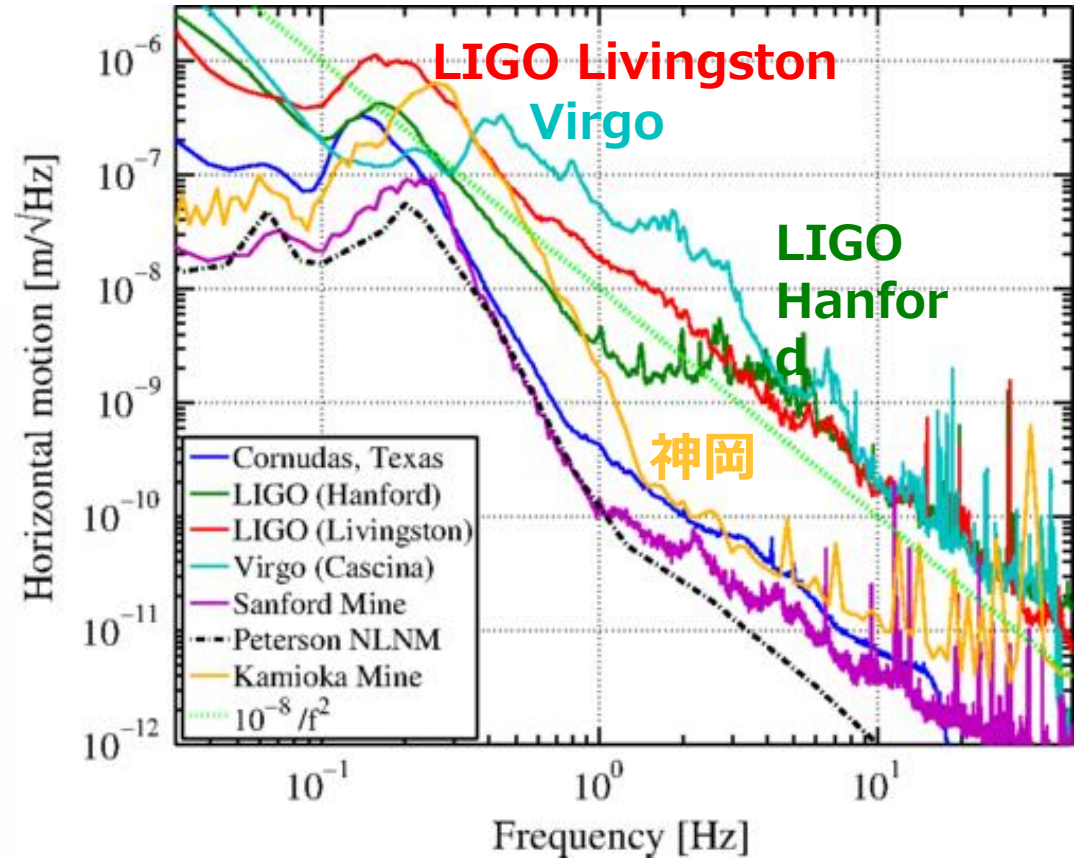
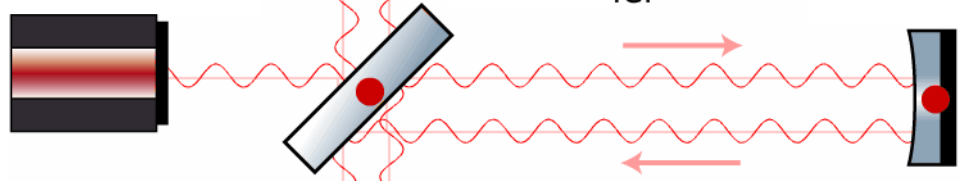
地下建設で地面の揺れを低減

- 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

地面振動



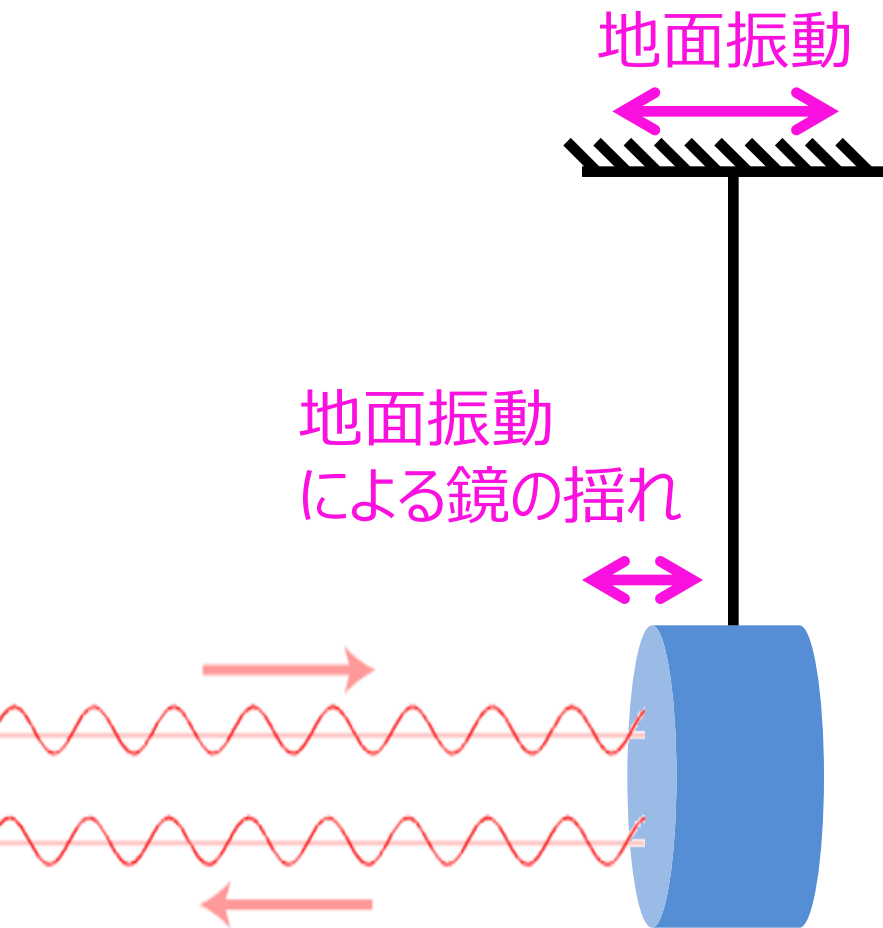
レーザー光源



R. X. Adhikari, [Rev. Mod. Phys. 86, 121 \(2014\)](#)

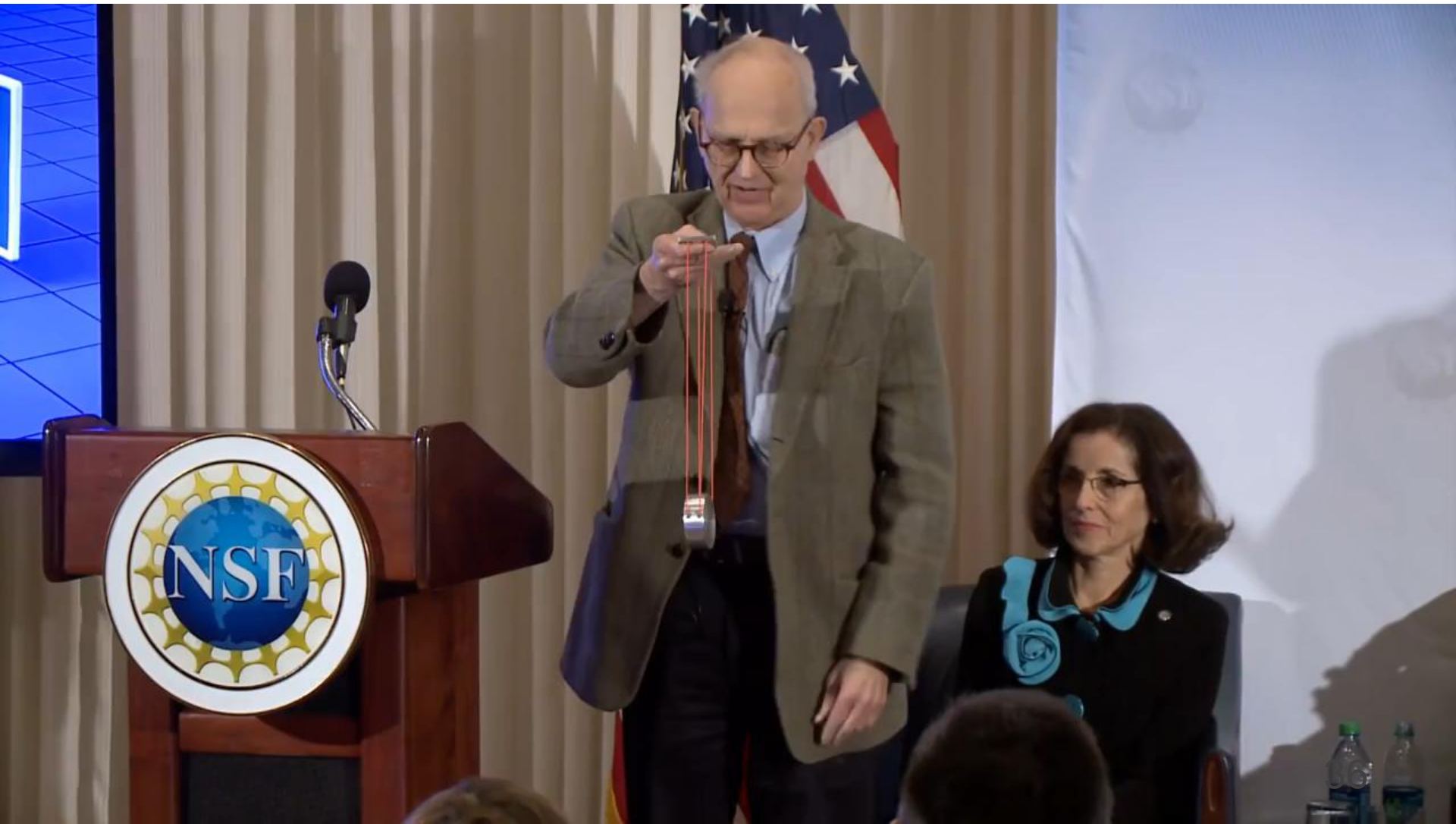
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



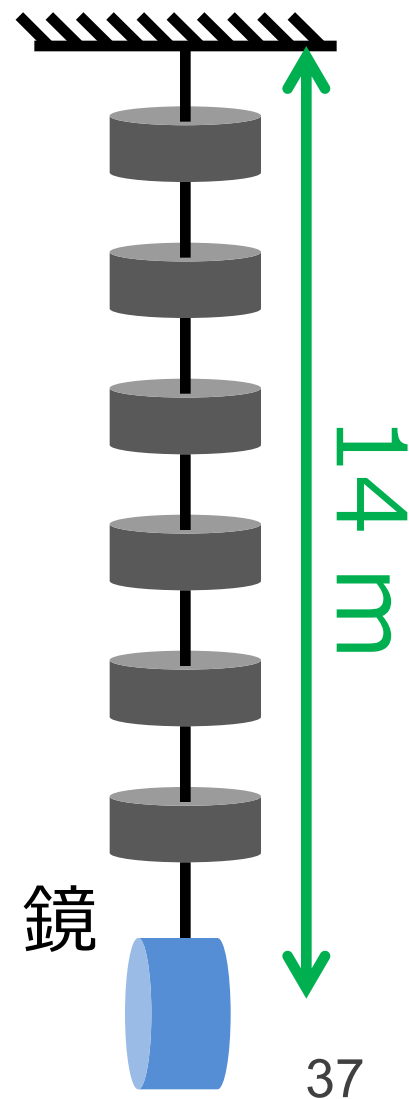
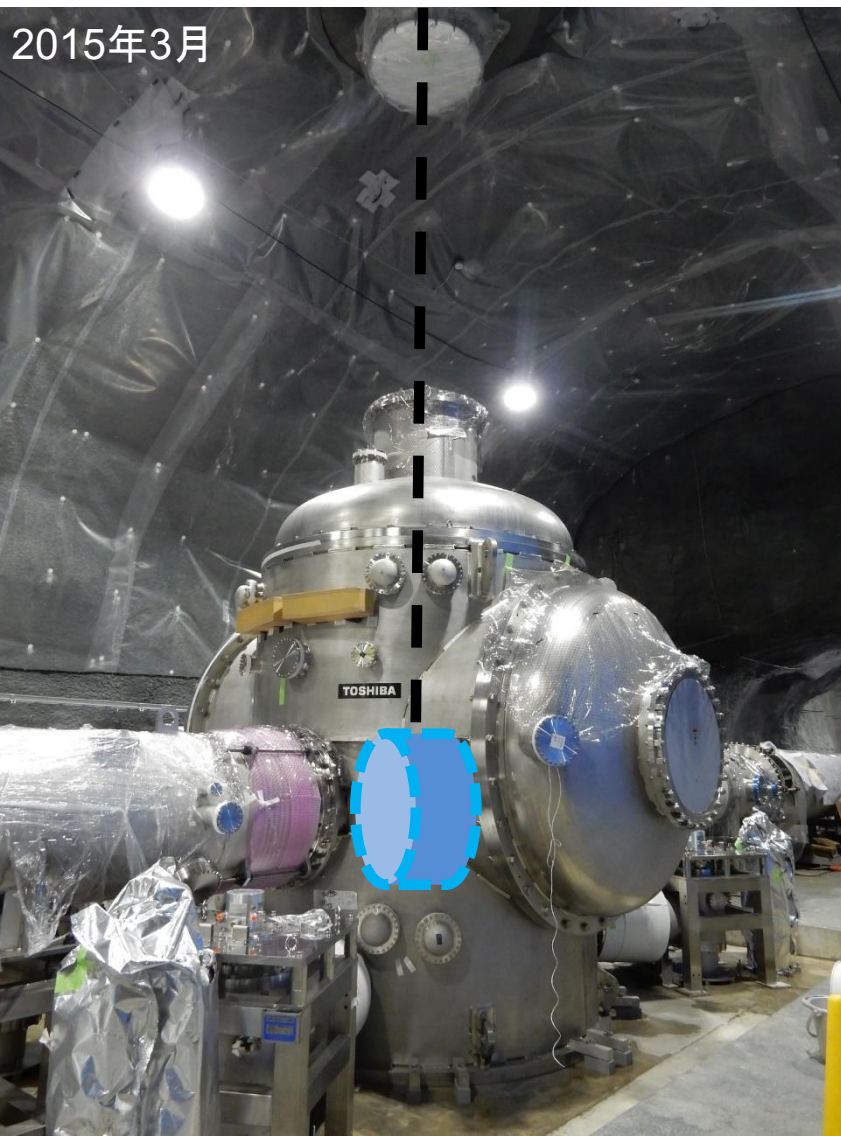
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



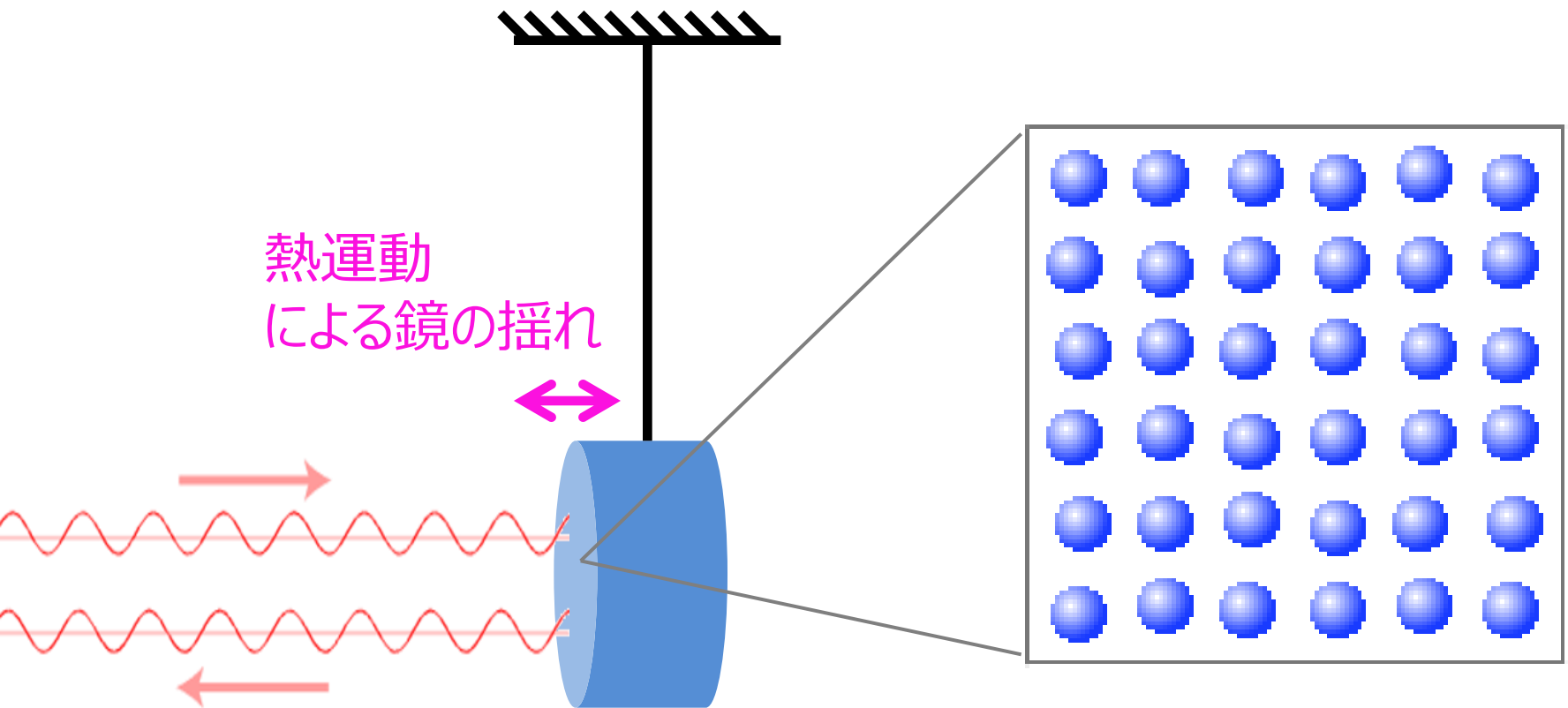
KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

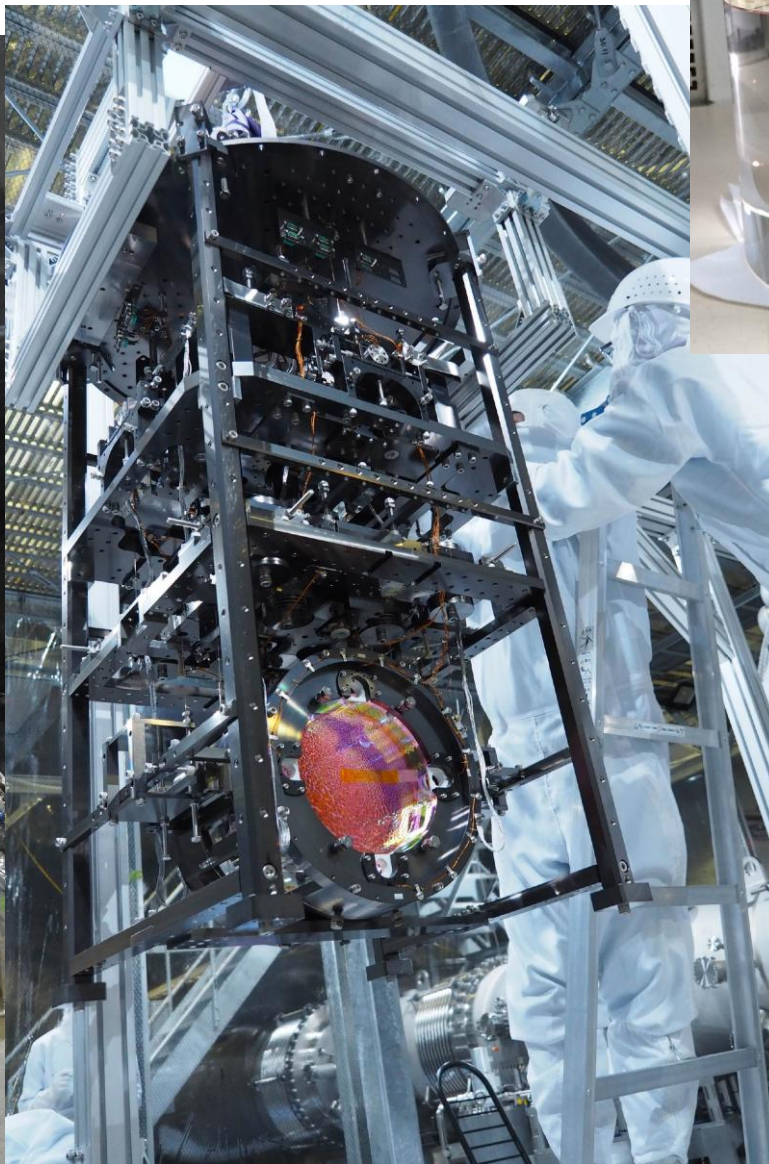
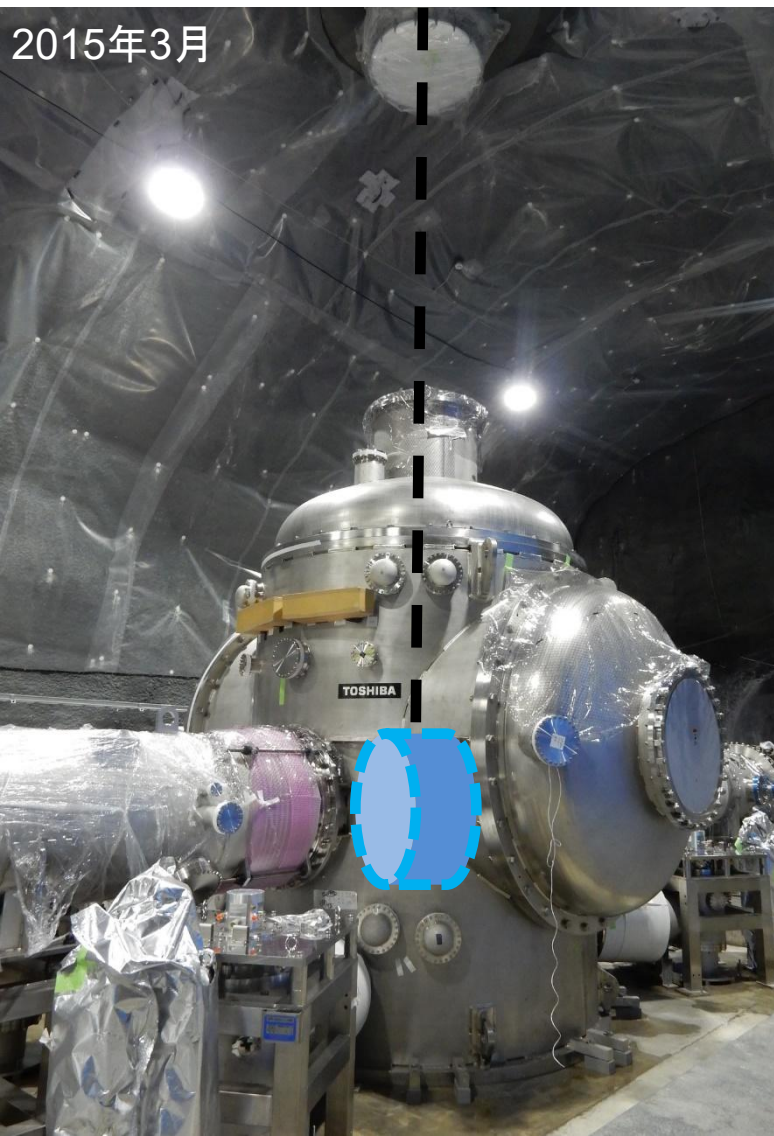


鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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



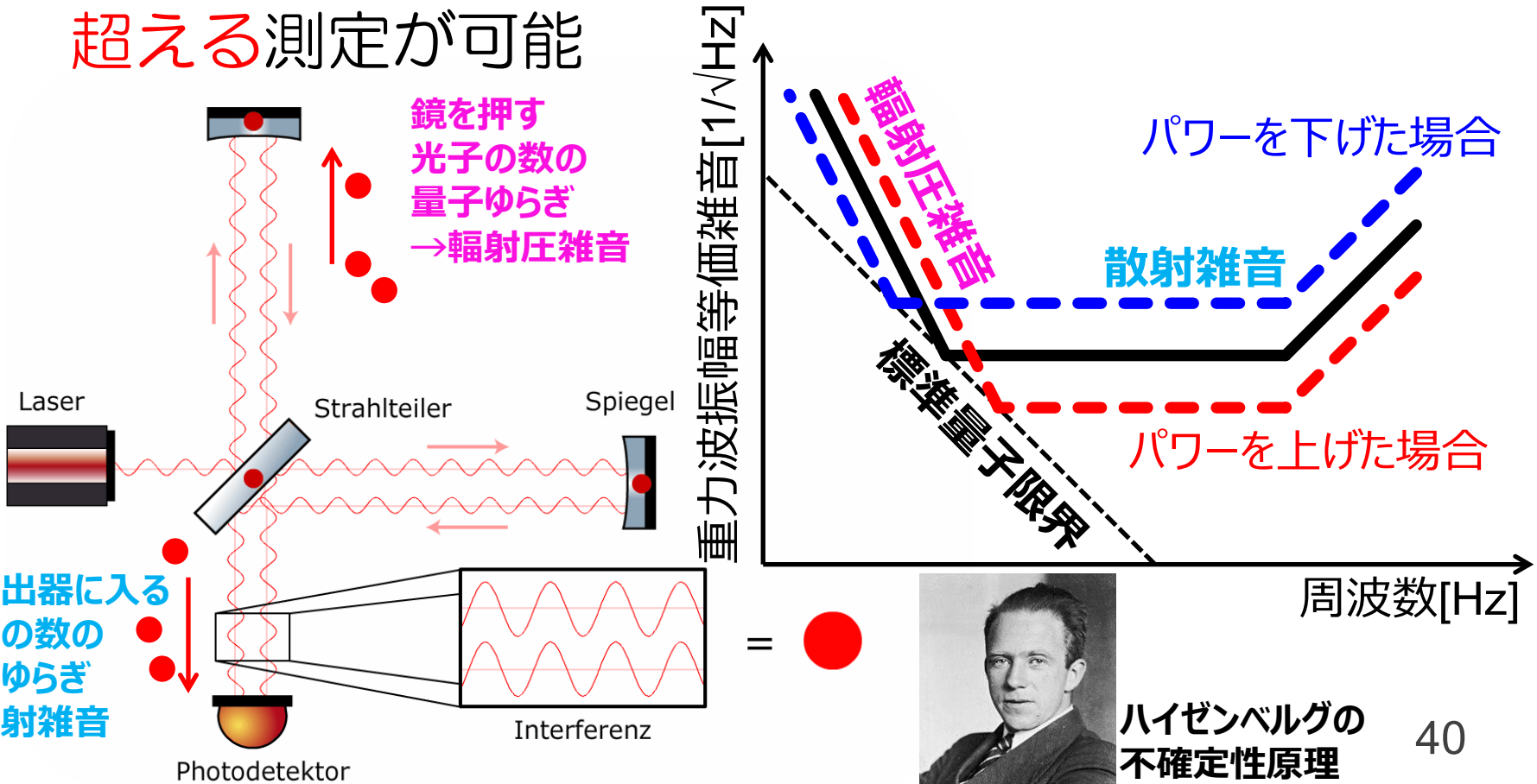
KAGRAの低温懸架装置



サファイア鏡
直径 22 cm
厚さ 15 cm

量子非破壊計測

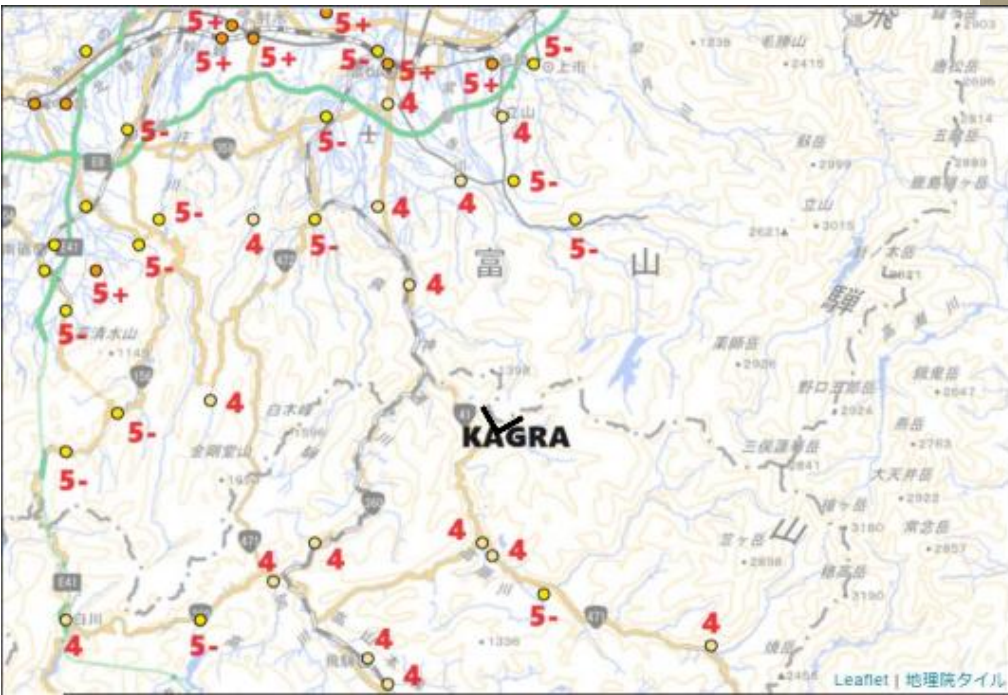
- レーザー光が強いほど、散射雑音は小さい
- レーザー光が弱いほど、輻射圧雑音は小さい
- 量子的な相関を利用することで、標準量子限界を**超える**測定が可能



ハイゼンベルグの不確定性原理

KAGRAの現状

- 2024年1月1日の能登半島地震(M7.6)で鏡の懸架装置などが損傷(坑内は震度3)
- 2024年10月に復旧、元の感度を達成
- 2025年6月11日に観測再開、11月19日に終了
- 感度約7 Mpc



観測再開祈願
KAGRA
神岡商工会議所
Shin'oka Chamber of Commerce and Industry

祈完全復活！世界に羽ばたけ！
よみがえれ
KAGRAの鼓動
岐阜県立飛騨神岡高等学校
生徒代表 倉住夏音

観測再開祈願応援メッセージ

飛騨市民から研究者の皆様へ
時空の深みで宇宙を暴く
大型低温重力波望遠鏡
KAGRA
観測再開祈願応援メッセージ

地元神岡のチームメンバーとしてKAGRAプロジェクトの経験へ。心より応援のメッセージを送ります。
地震という季節は自然災害によって、長年にわたる努力と準備が一瞬の瞬間に奪われることがあります。この困難を乗り越え、プロジェクトが再び前に進むことを強く願っています。
重力波検出という宇宙の謎を解き明かすための重要な試みは、人類の知の境界として常に目の前にはあるものであります。私たちチームメンバーにとっても、大きな誇りとなっています。
私たちは、KAGRAプロジェクトの活動を通じて多くの方々と繋がる機会を得たことを非常に喜んでいます。KAGRAプロジェクトがもたらした多くの力を発揮する日を心待ちにしています。

ジオスペースアドベンチャー実行委員会
及びボランティアスタッフ 一同

地震に負けるな！KAGRA
復活の日を皆で待っている
飛騨市役所職員一同

頑張ろうKAGRA！
さらなる進化を遂げた復活を！！
神岡商工事務職員一同

天文観測につながる
設備が再び目に見える
行きたいです。
応援しています！！

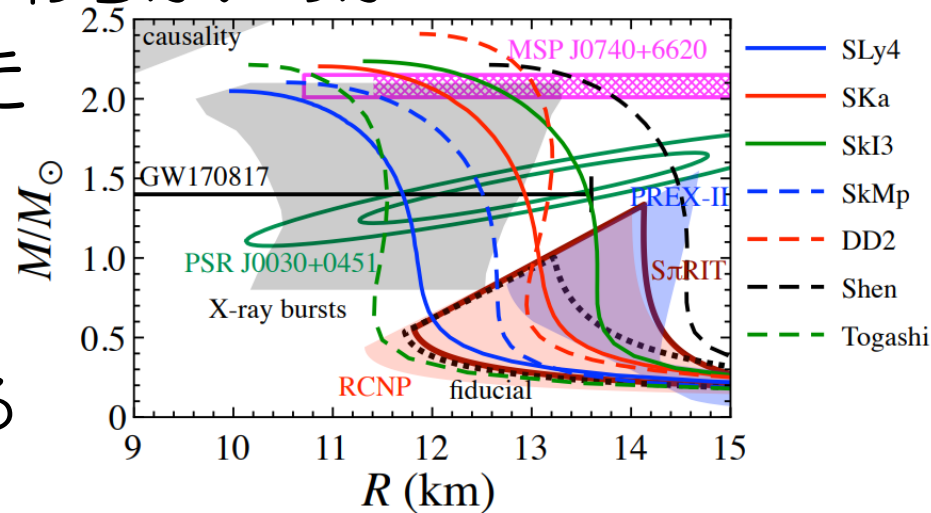
世界が注目している
KAGRAが早く復活
することも願っています。
神岡の希望です。

震災に負けない、強い
KAGRA。
KAGRAの復活は、震災
からの復興の光です。
応援しています！！

神岡中学校

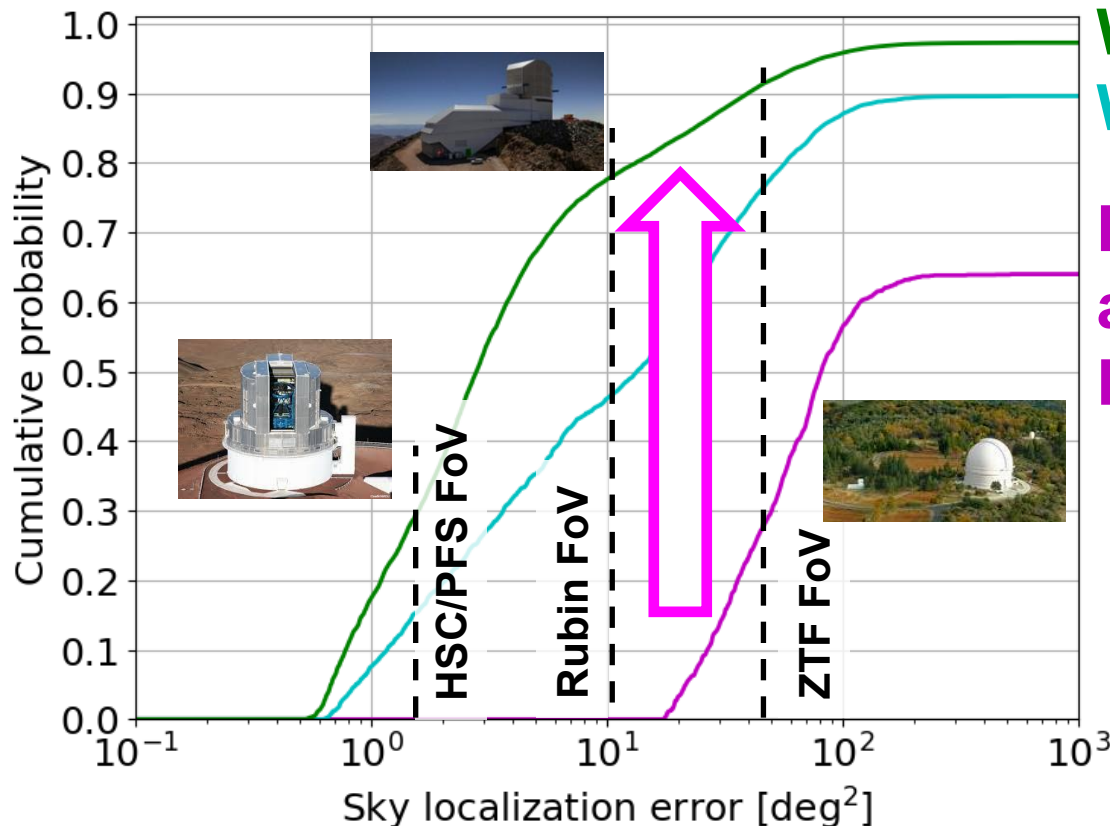
KAGRAのこれから

- 複数台観測で重力波の**到来方向を特定**し、光学望遠鏡とマルチメッセンジャー観測を行う
- **宇宙膨張の歴史**の測定 c.f. DESI, [PRD 112, 083515 \(2025\)](#)
- 中性子星の**状態方程式**
 - 連星中性子星は合体後に中性子星になるのか、ブラックホールになるのか
 - 中性子星は硬いのか、やわらかいのか
- 一般相対性理論を超えた**新しい重力理論**の検証
 - ブラックホールの準固有振動
 - 一般相対性理論を超える重力波の偏極モード



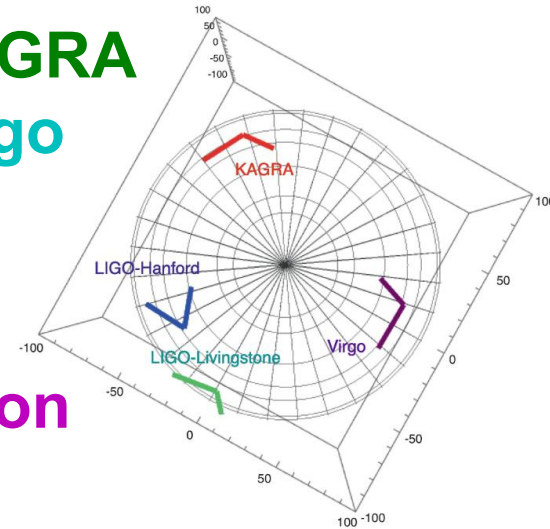
With Addition of KAGRA...

- Better sky coverage and 3+ detector duty factor
- Better sky localization helping multi-messenger
 - 1~5 BNS detections/year localized $< 10 \text{ deg}^2$ in O5
 - 5~23 BNS detections/year localized $< 10 \text{ deg}^2$ in O6



With KAGRA
With Virgo

Hanford
and
Livingston



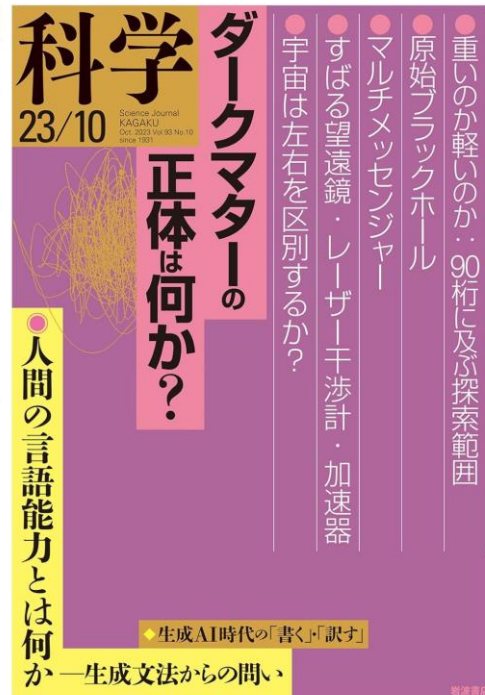
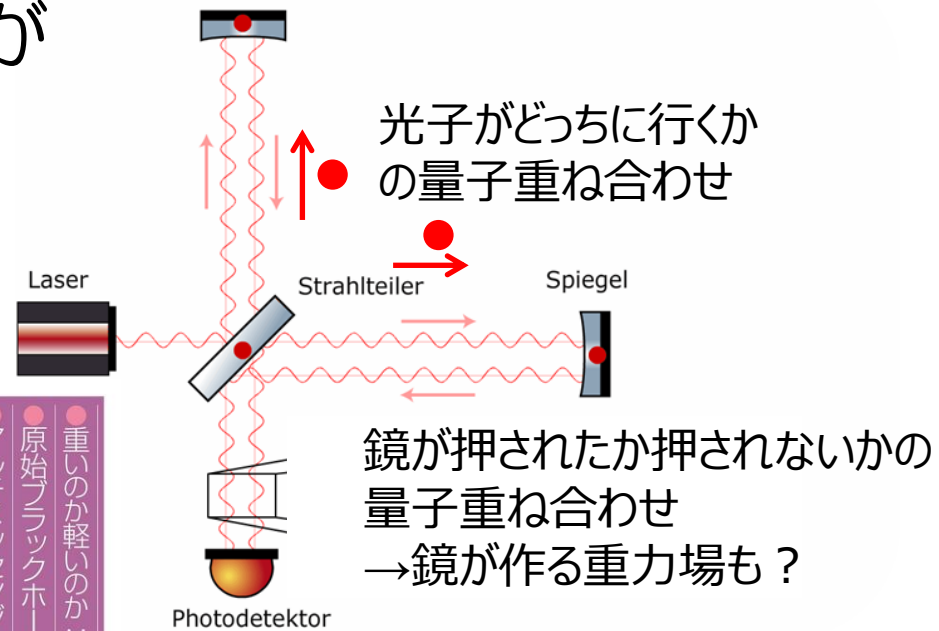
- * Fisher analysis for BNS at 100 Mpc
- * Single detector duty factor of 80% assumed
- * BNS merger rate
90-450 /Gpc³/yr

See, also:

R. Weizmann Kiendrebeogo+,
[ApJ 958, 158 \(2023\)](#)

KAGRAのこれから

- 低温を活かし、量子限界を超えた感度を実現
- シュレディンガーの猫が実現できるかも？
- ダークマター探索も



LIGO-India (4 km, Room Temp.)

- Aundha **site acquired** in May 2023
- Being built as the Advanced LIGO configuration
- Aim to be operational in the **early 2030s**



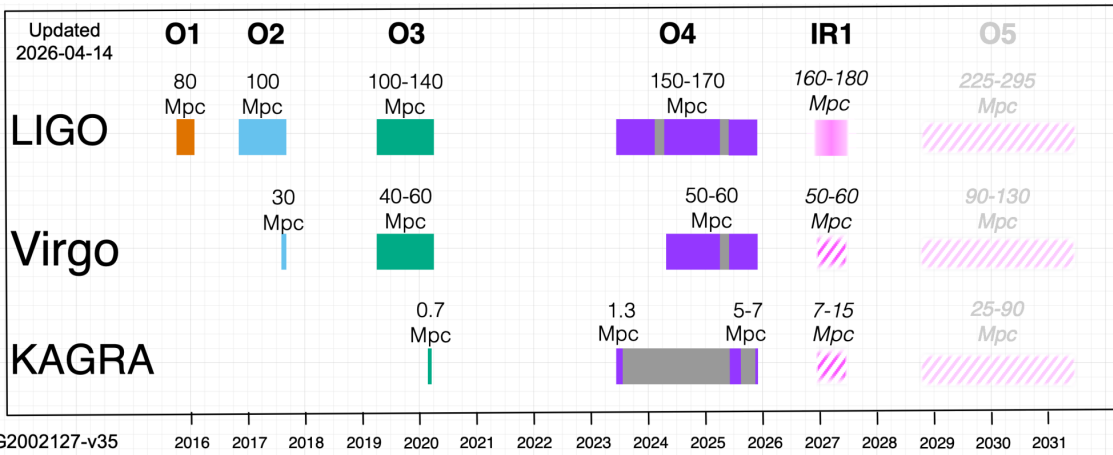
1:1 scale vacuum testing



**10 m prototype at RRCAT
being built for testing
and training**

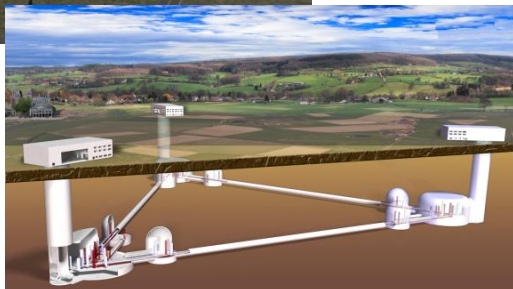
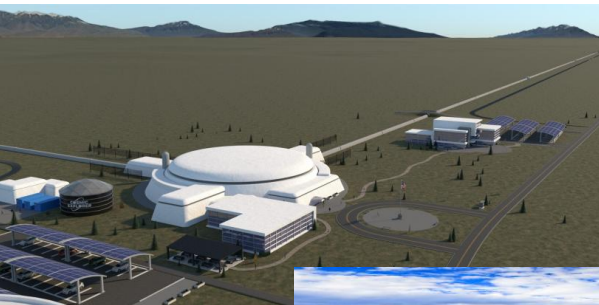
Next Generation Detectors

- Next generation detectors coming in **late 2030s**, **with space-based** detectors (multi-band!)



2030s

2040s



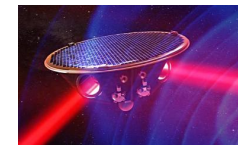
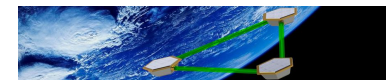
LIGO India

Cosmic Explorer

Einstein Telescope

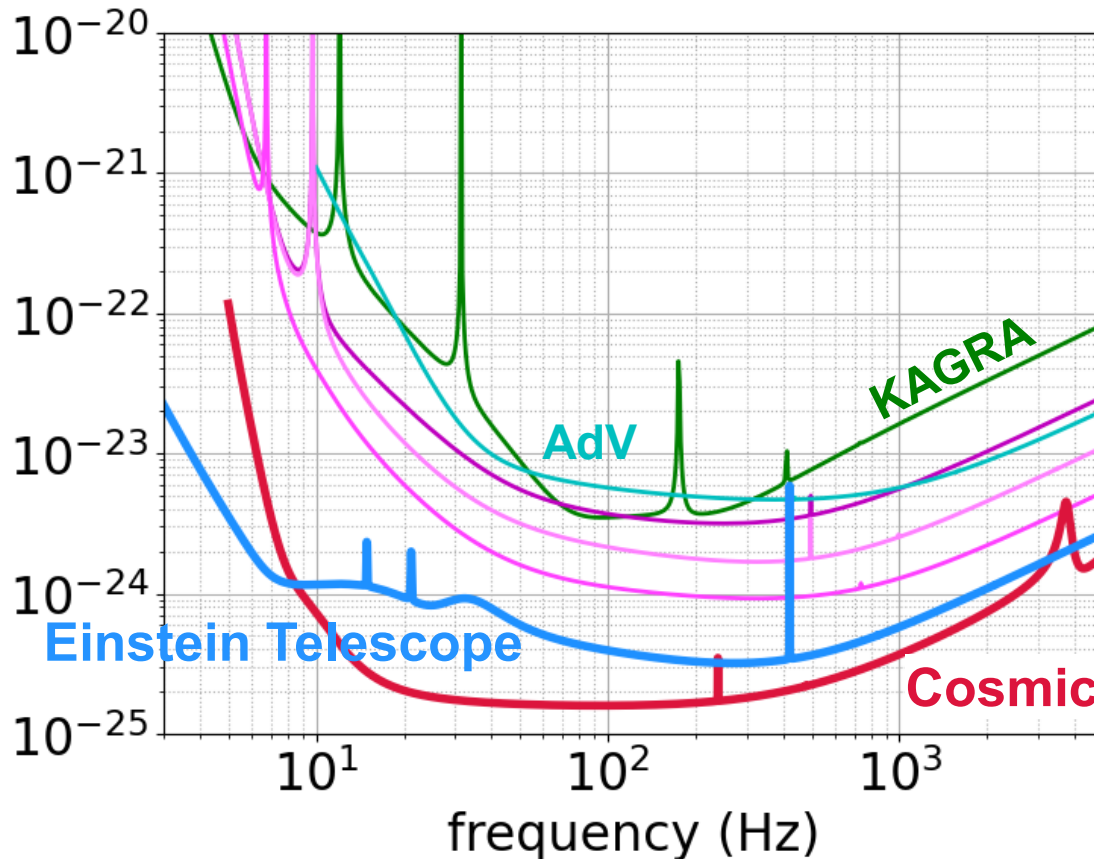
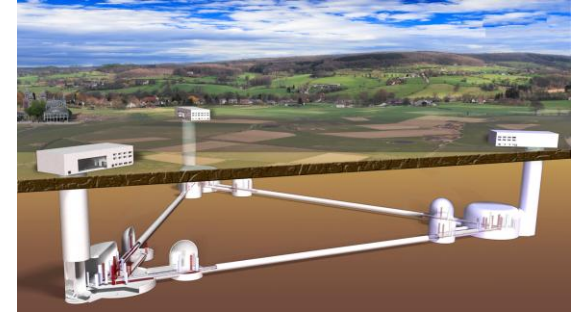
B-DECIGO

LISA

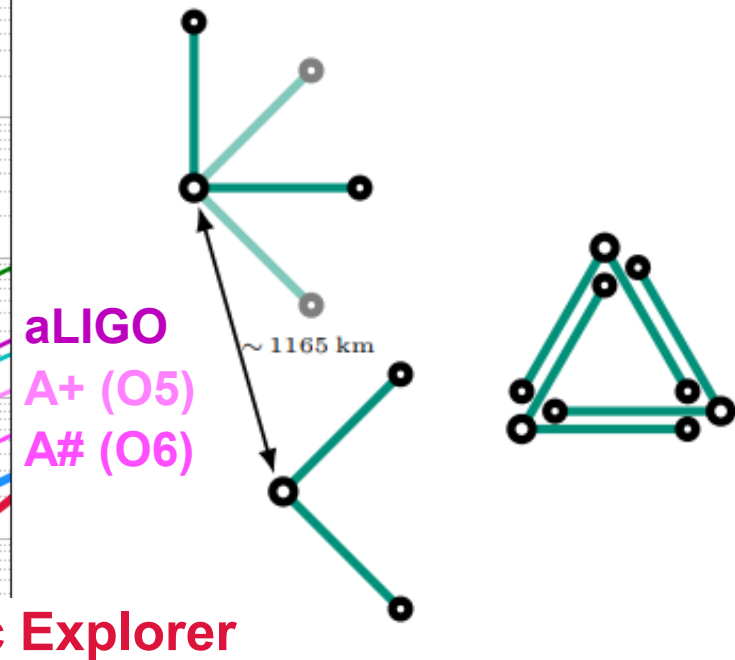


Einstein Telescope

- Xylophone configuration
 - 10 K silicon interferometer for low frequency
 - Room temp. fused silica interferometer for high frequency
- 10 km Δ or two 15 km L, underground

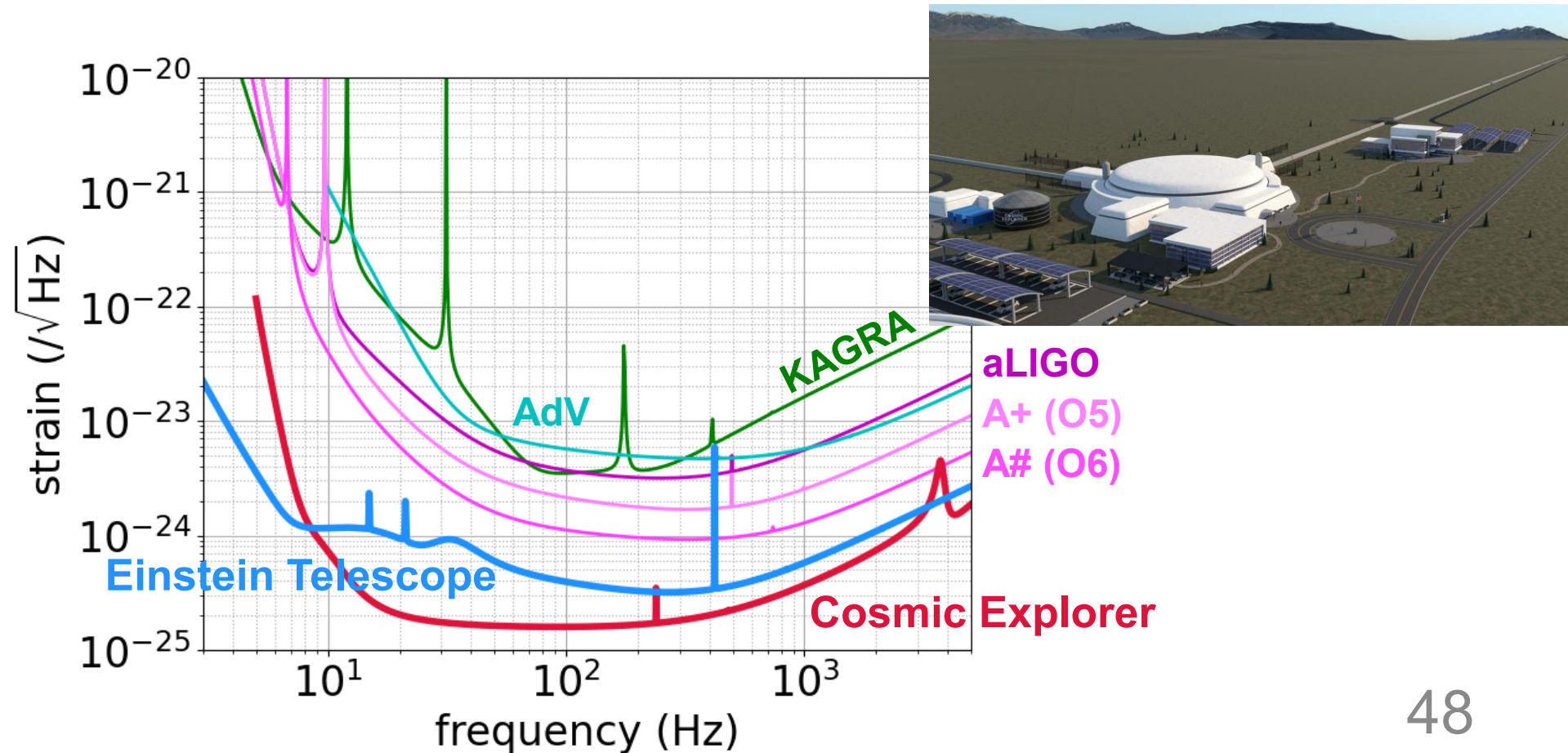


Branchesi+, [JCAP 07, 068 \(2023\)](#)



Cosmic Explorer

- 40 km and 20 km L-shaped
 - 40 km only if ET in Europe
- Room temp. fused silica (technical overlap with A#)

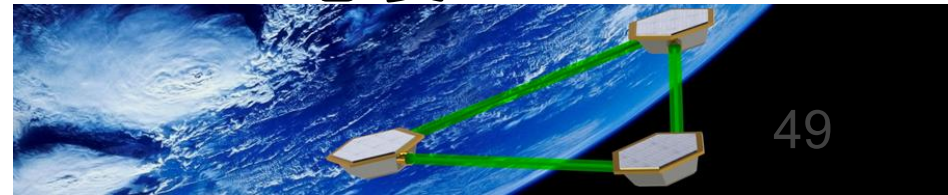
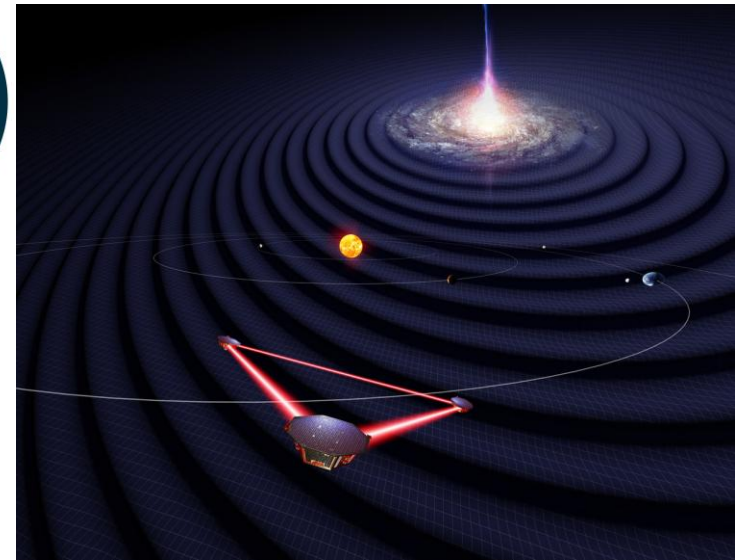


宇宙重力波望遠鏡計画

- 地上ではレーザー干渉計の大きさは数10 kmが**限界**
 - また、**地面振動**から10 Hz以下の感度向上が困難
- 宇宙重力波望遠鏡

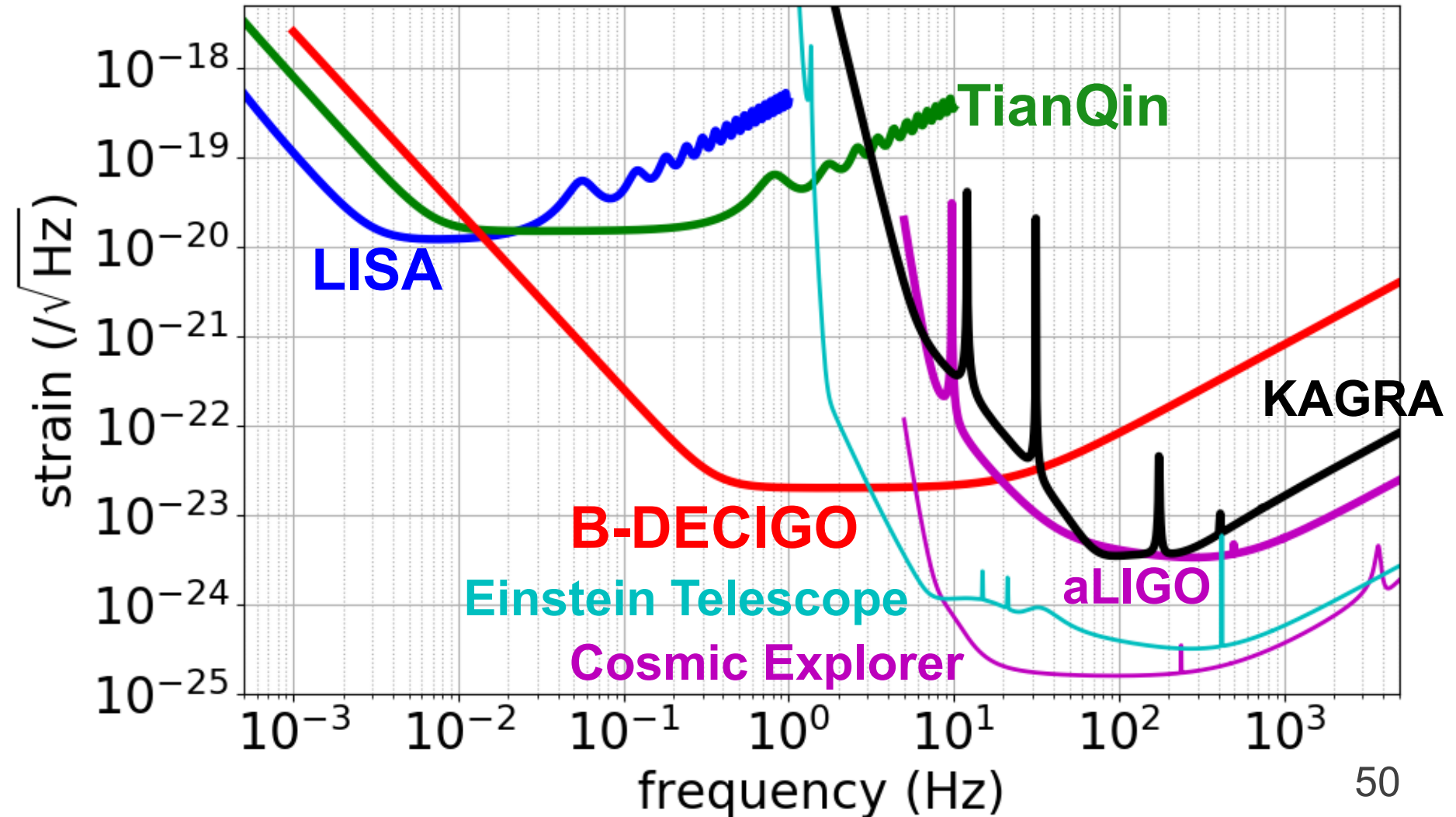


- LISA(りさ): 1-10 mHzに感度
 - ヨーロッパ主導
 - **2035年**に打ち上げ予定
 - 2016年にはLISA Pathfinderでの**実証実験に成功**
 - 中国にも同様の計画: **TianQin** (天琴), **Taiji** (太極)
- DECIGO(でさいご): 0.1-10 Hzに感度
 - 日本、2030年代目指す

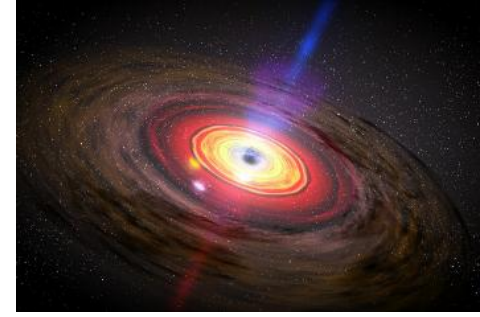


地上と宇宙の感度の比較

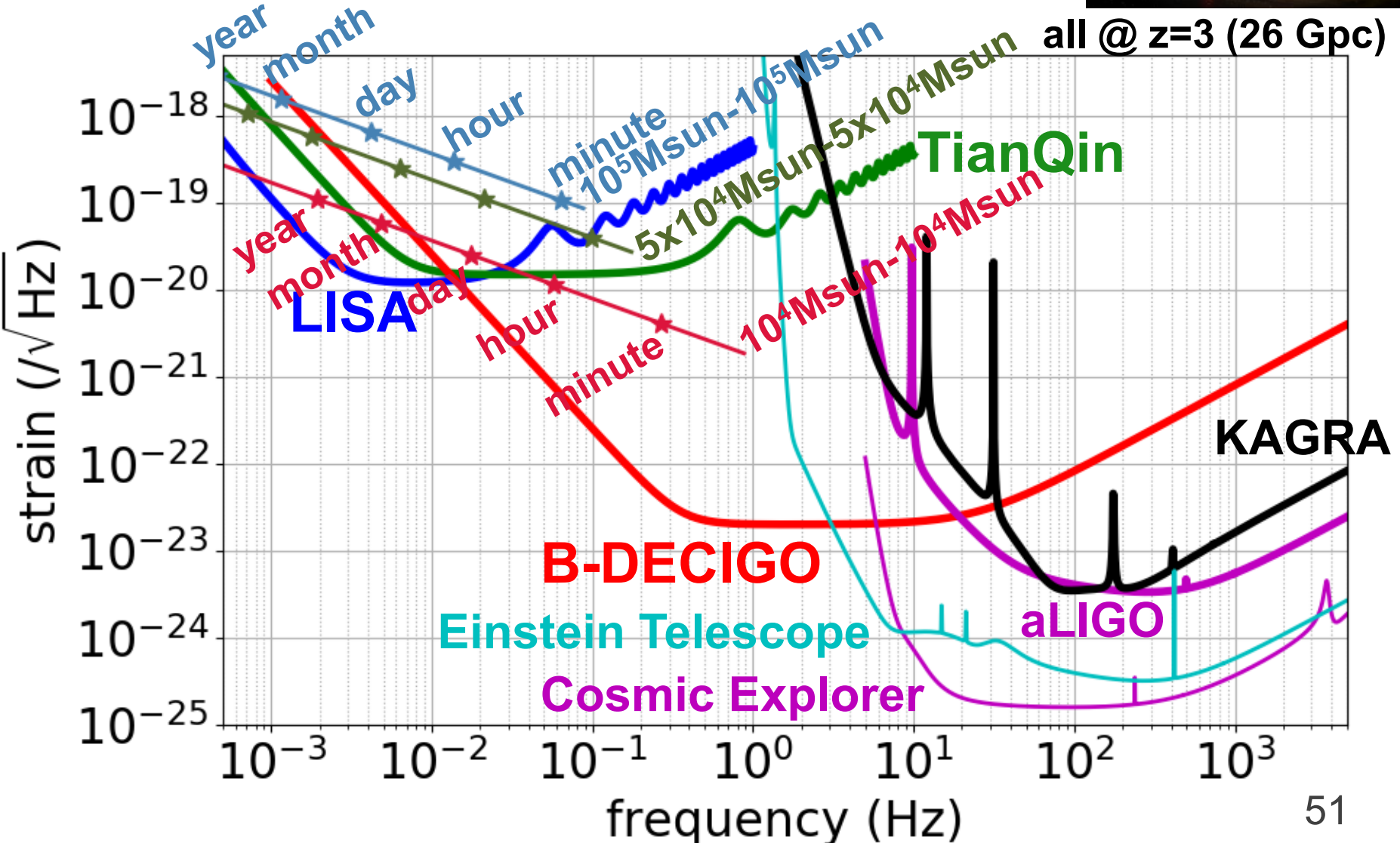
- 宇宙では地上に比べて低周波数帯に感度を持つ



超大質量ブラックホール

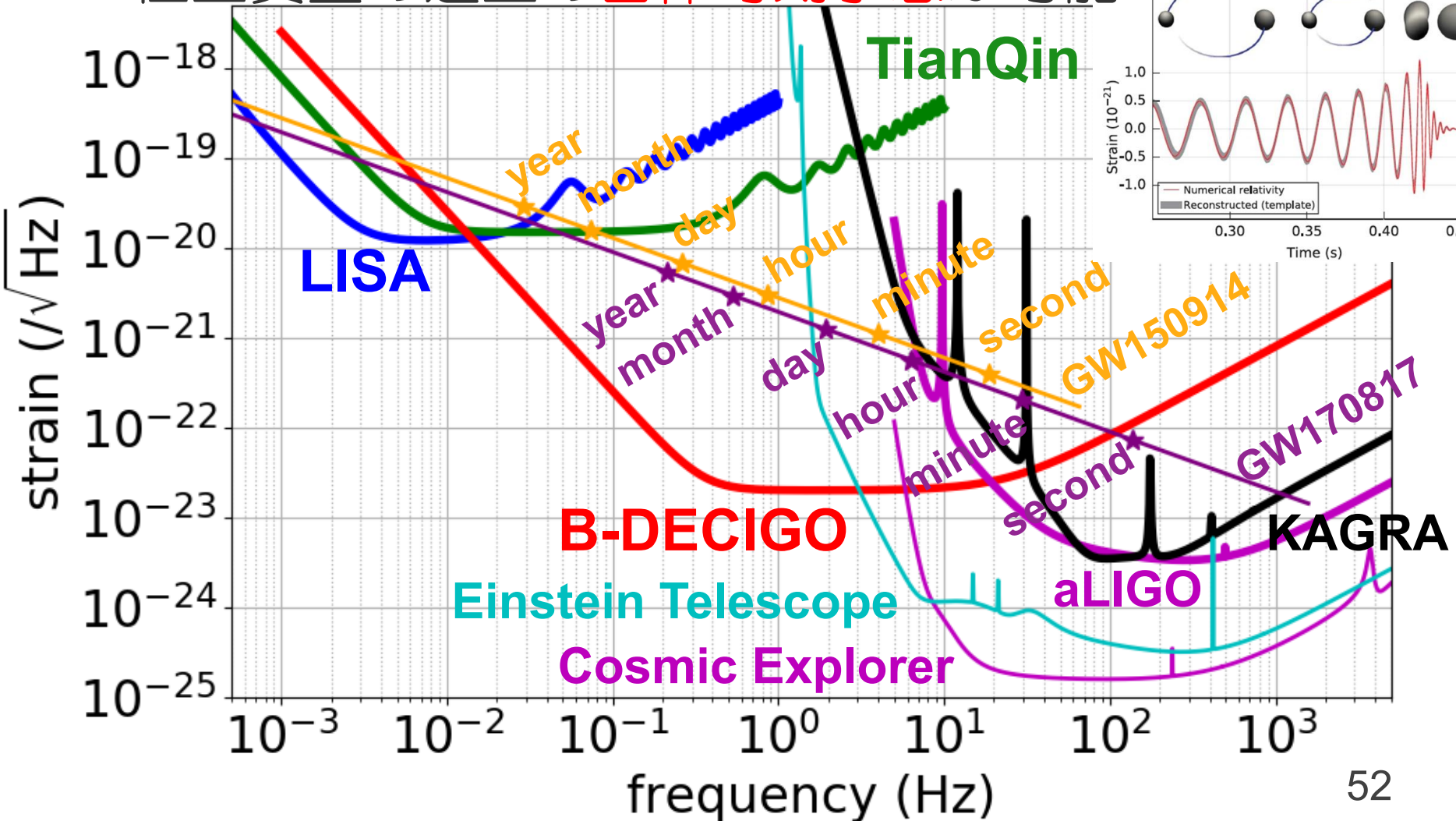
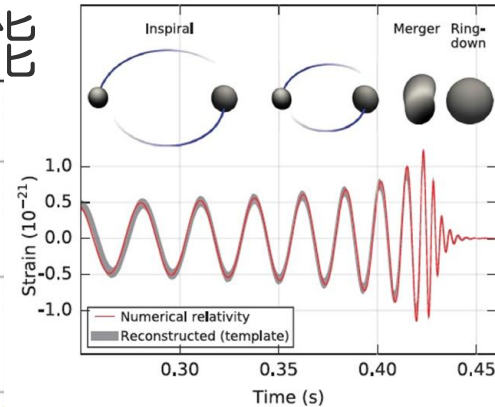


- LISAが得意



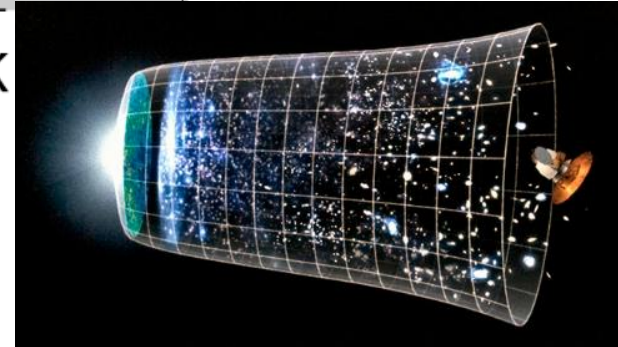
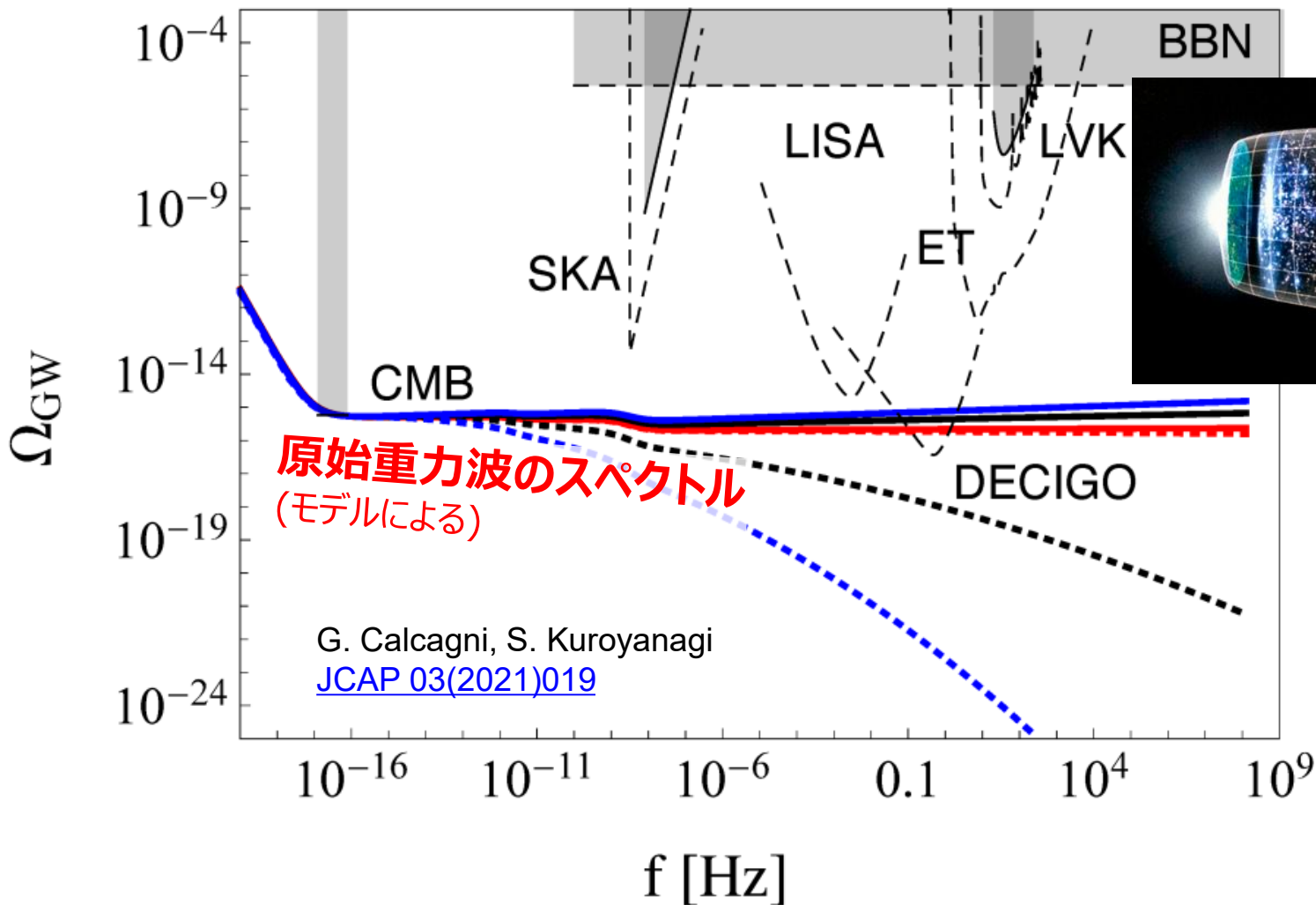
多波長重力波観測

- DECIGOにより中間質量ブラックホールの合体や恒星質量の連星の合体時刻予想が可能



インフレーション起源の原始重力波

- DECIGO帯が最適
- インフレーションのメカニズムに迫る



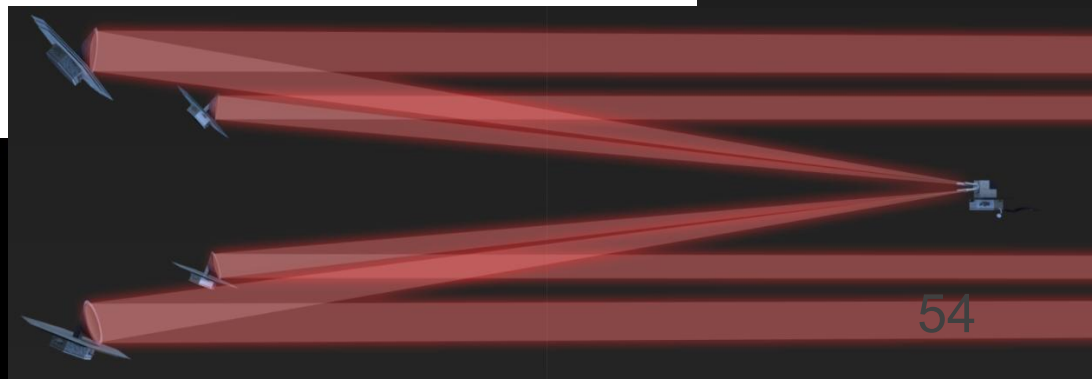
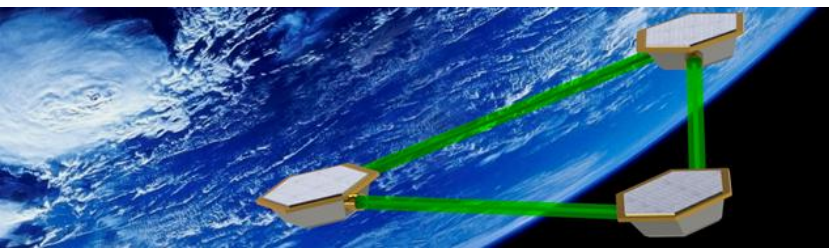
SILVIA計画



- Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications
- サブミクロン級の超精密編隊飛行技術を実証
- DECIGOや赤外線干渉計LIFEにつながる
- 2020年2月にJAXAに提案
現在ミッション定義フェーズ

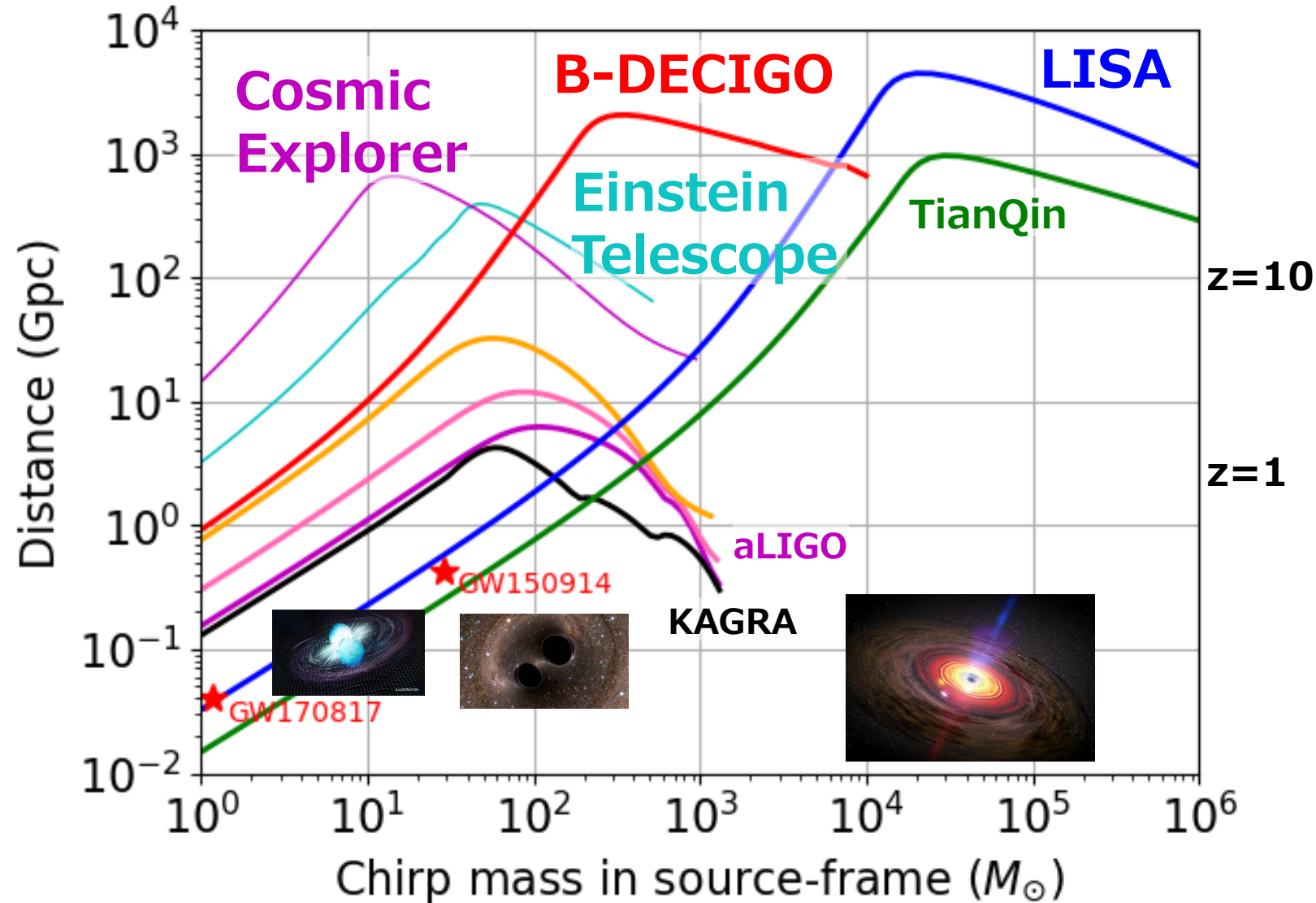


⇒ LIFE

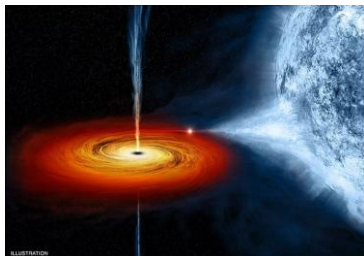


連星合体の検出可能距離

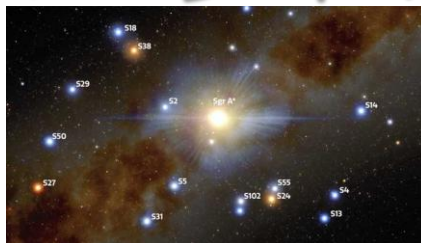
- 2030年代後半には全宇宙の連星合体の観測へ



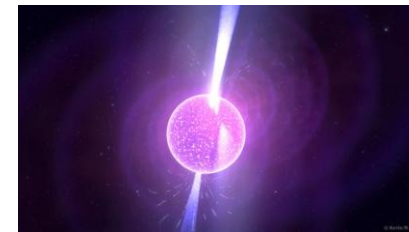
電磁波のスペクトルと天文学



ブラックホールの発見

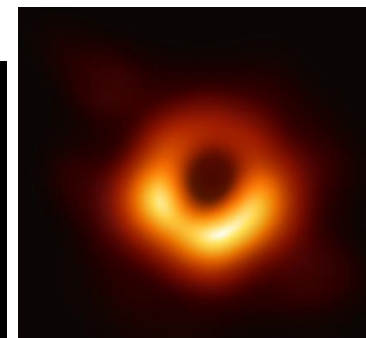
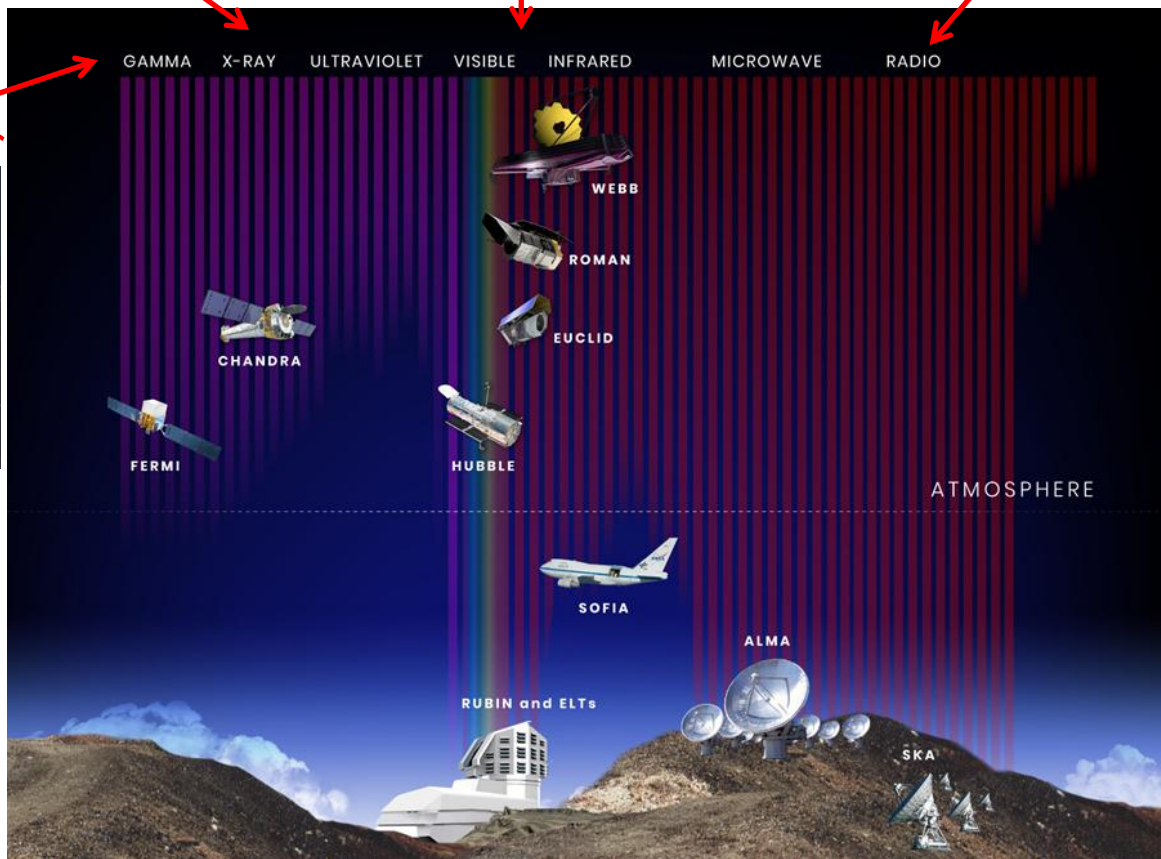
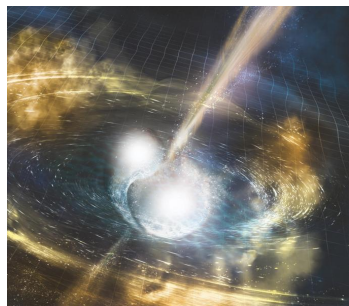


超大質量ブラックホールの発見



パルサーの発見

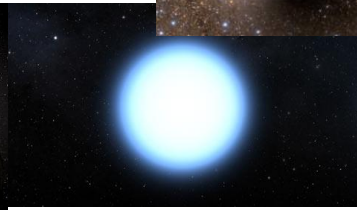
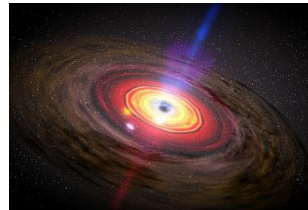
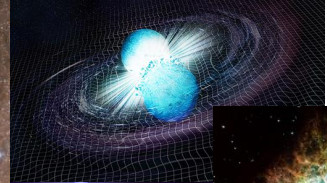
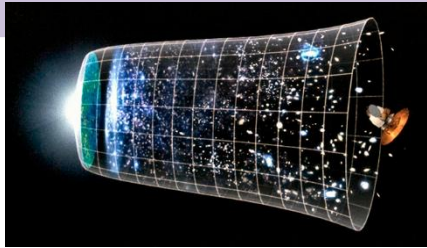
ガンマ線バースト



ブラックホール・シャドウ

重力波のスペクトルと天文学

インフレーション起源の原始重力波



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

パルサータイミング

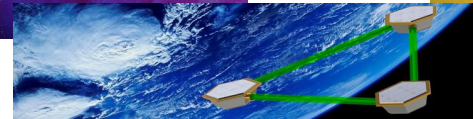
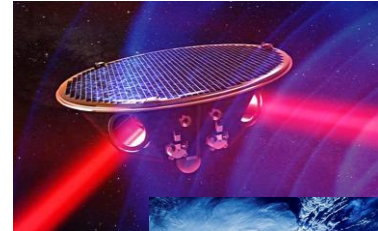
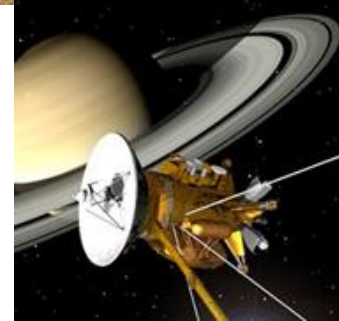
地上干渉計

宇宙マイクロ波
背景放射
Bモード観測

ドップラー
トラッキング

宇宙干渉計

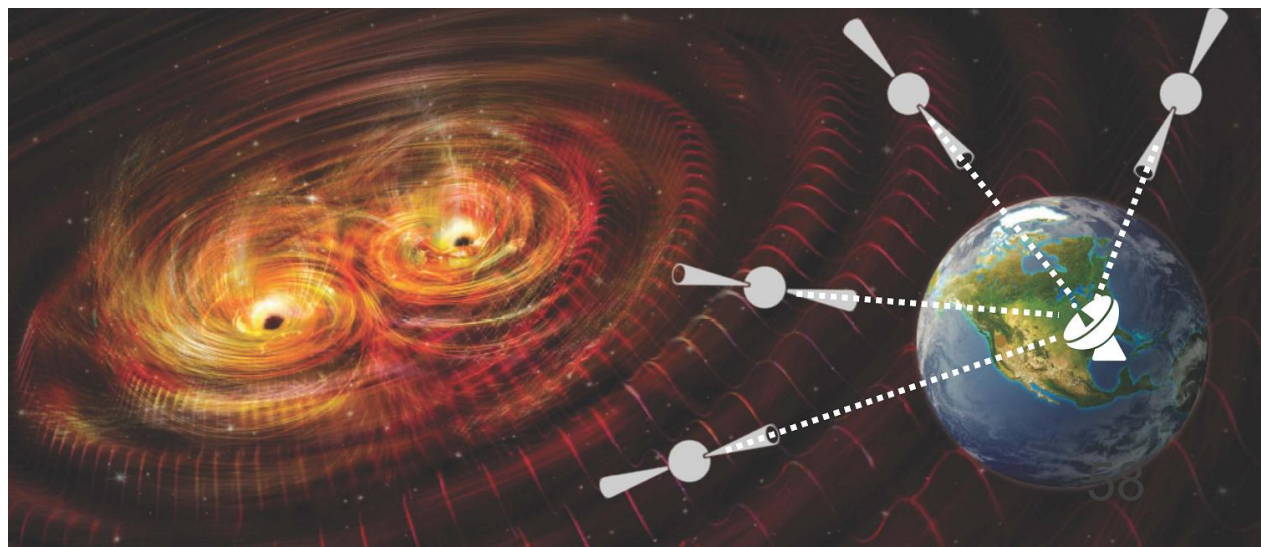
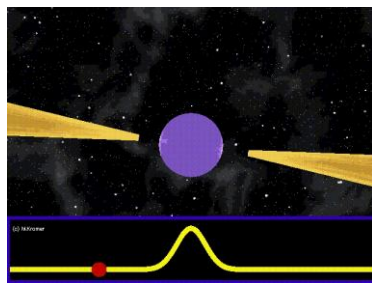
共振型検出器



パルサータイミング

- パルスの周期の変化を長期間にわたって調べる
- 2023年6月 **背景重力波の検出**を発表
 - NANOGrav: 北アメリカ(15年分のデータ)
 - EPTA: ヨーロッパ
 - PPTA: オーストラリア
 - InPTA: インド
 - CPTA: 中国
- 多くの**超大質量ブラックホール連星**からの重力波の重ね合わせか？

お祝いのケーキ
@Caltech



宇宙マイクロ波背景放射の観測

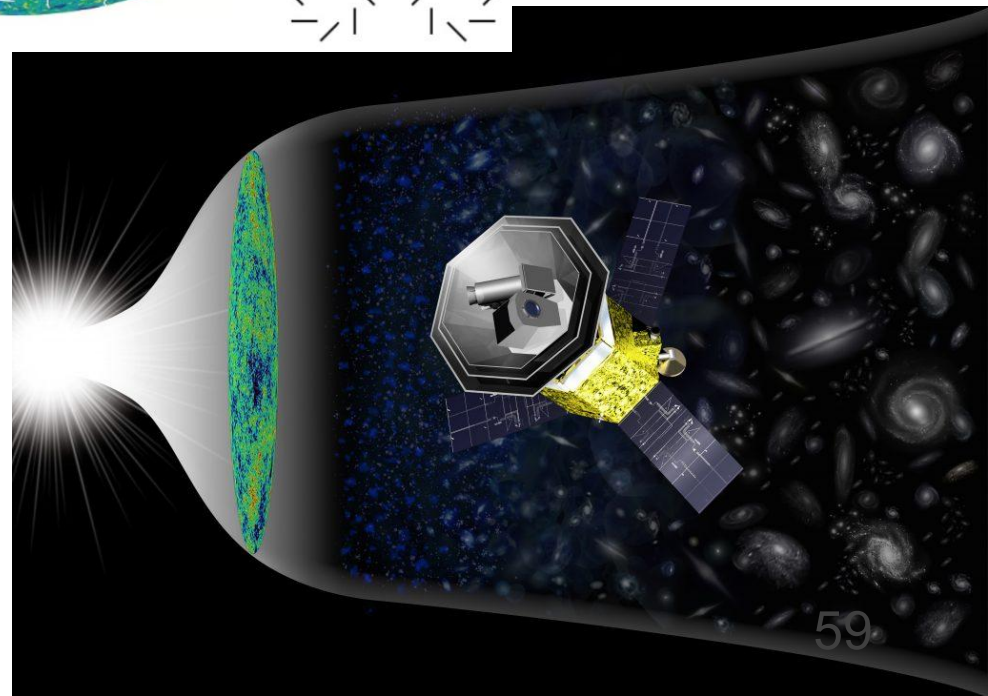
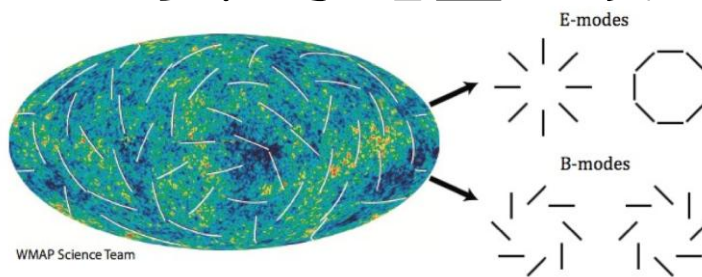
- 宇宙マイクロ波背景放射
 - 全宇宙からほぼ等方的に観測される2.725 Kの黒体輻射
- この**偏光観測**により、原始重力波をとらえる

- LiteBIRD

2032年の打ち上げ
を目指す

- Simons Observatory

2024年観測開始



重力波天文学は始まったばかり

- 2015年の初検出以降、**重力波が続々と検出**
- 2023年には**パルサータイミング**も背景重力波検出
- **KAGRA**も感度を向上中
- 2030年代以降には地上の**次世代望遠鏡**、**宇宙望遠鏡**も加わり、全宇宙の連星合体を観測可能に
- 今後も、**重いブラックホール**の起源、**重元素**の起源、**インフレーション**の解明など

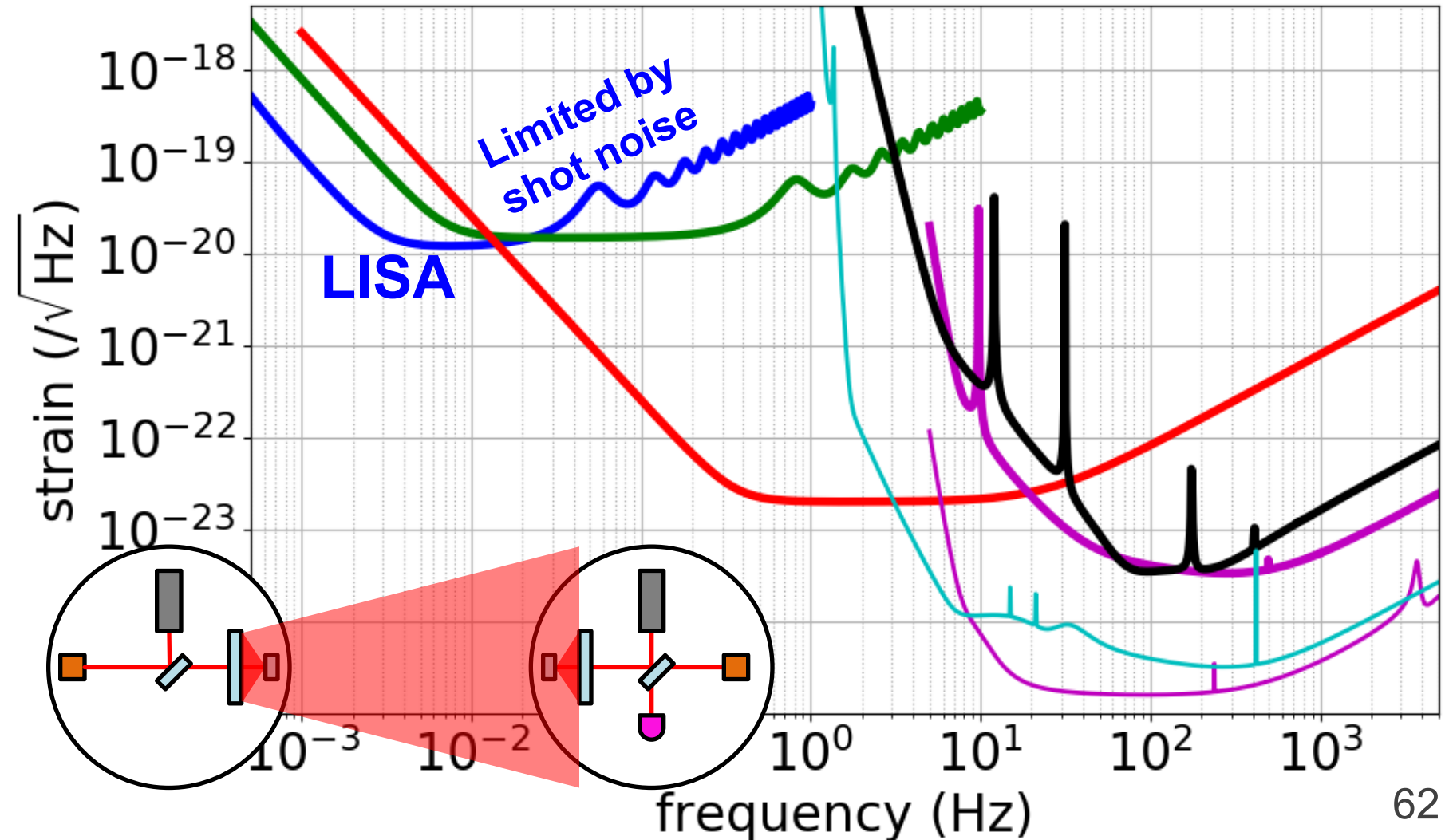


我々はどこから来たのか
我々は何者か
我々はどこへ行くのか
(ポール・ゴーギャン、1897-1898年)

おまけ

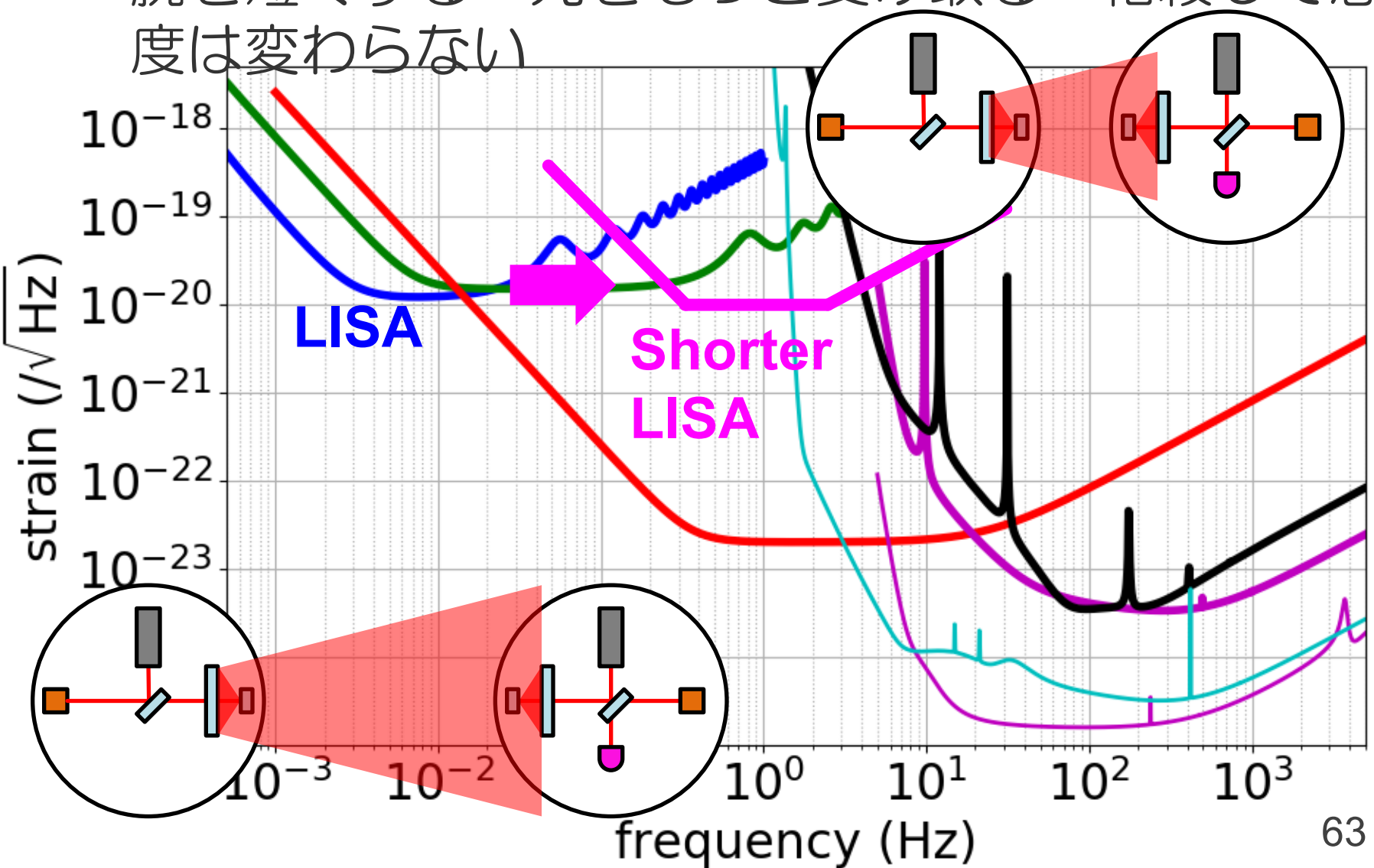
LISAの感度曲線

- 出射した1 Wのうち、 ~ 100 pWを検出



腕を短くしても、感度不足

- 腕を短くする→光をもっと受け取る→相殺して感度は変わらない



DECIGOの実現には光共振器が必要

- 衛星間を光が何度も往復するように光共振器

