

重力波望遠鏡 **KAGRA** で聴く 宇宙の音

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

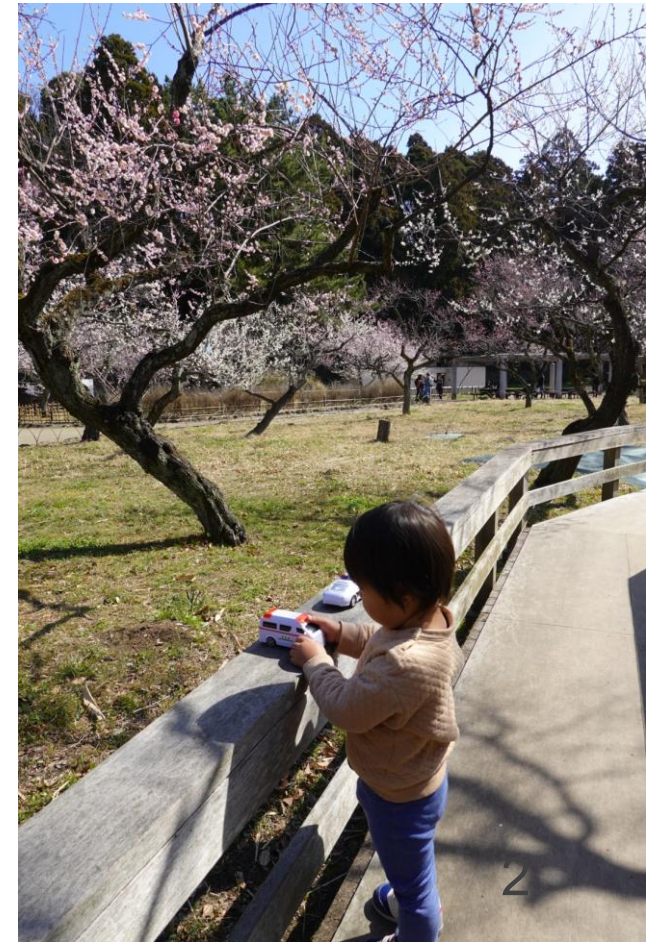


<https://tinyurl.com/YM20250822>

自己紹介



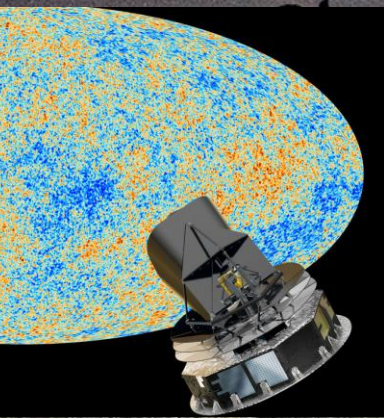
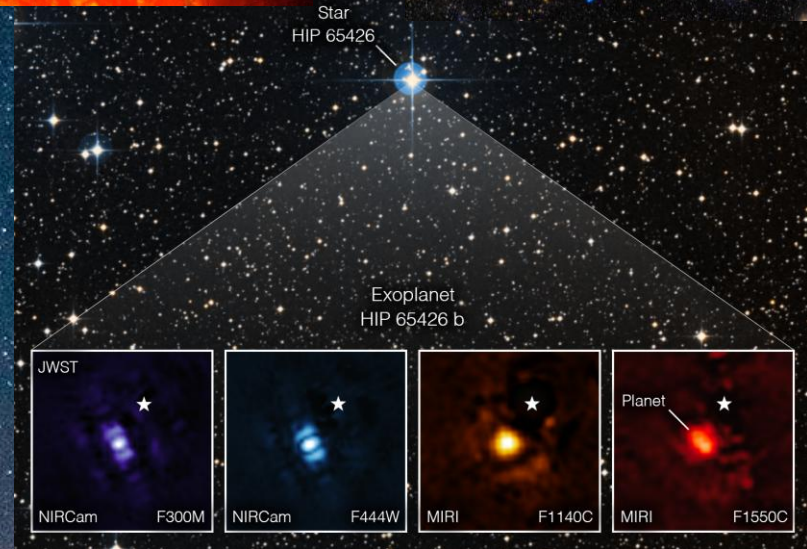
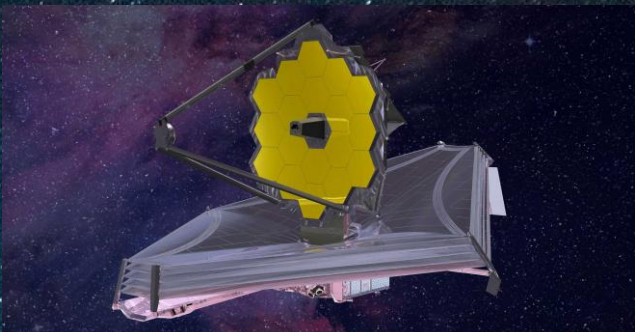
- 道村唯太 (みちむら ゆうた)
東京大学 大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター 准教授
- 1987年生まれ
- 横浜市磯子区
- 2015年に東京大学で
博士(理学)取得
- 実験重力物理学



2023年3月
こども自然公園(横浜市旭区)







1609年 ガリレオが望遠鏡を作る

月面

金星

土星 →

ガリレオが望遠鏡を見ながら描いたスケッチ

なんじゃこりやーっ!!

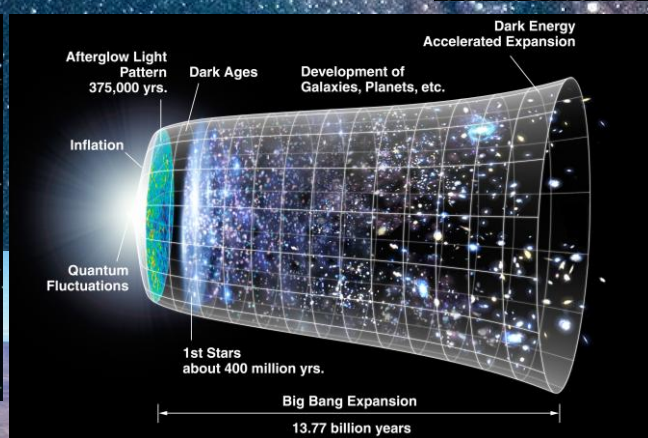
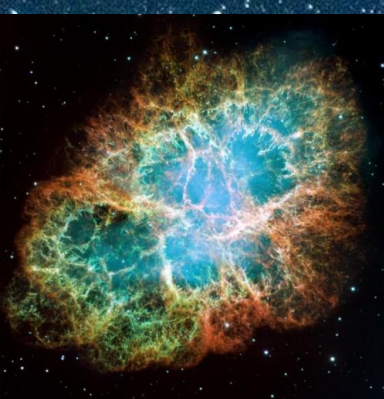
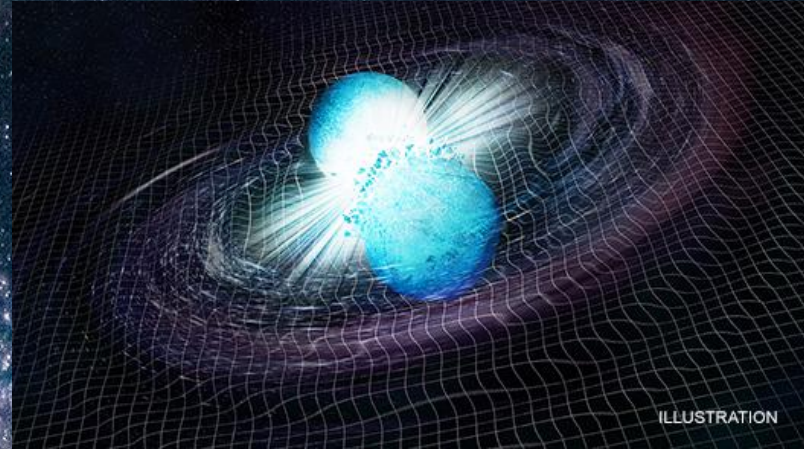
とさけんだかもしれない...
レンズ越しに見た脅威の世界

すばる

5

ガリレオ・ガリレイ 1564-1642







2017年 ノーベル物理学賞

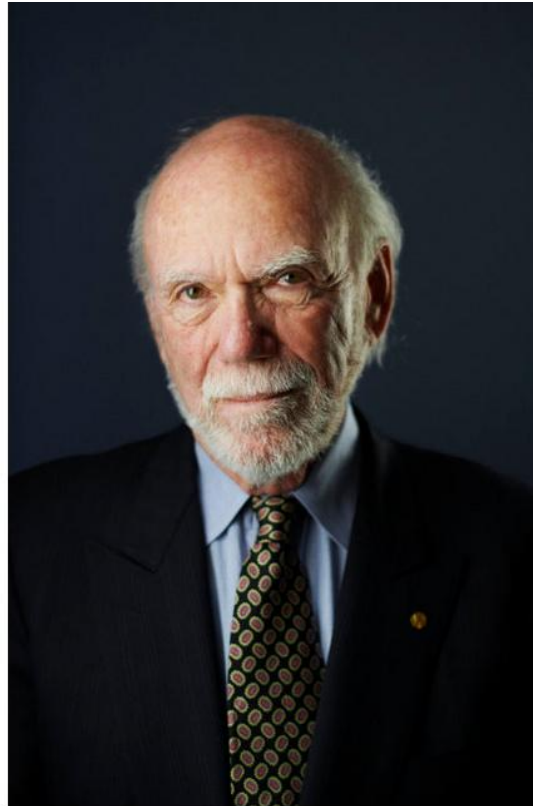
- LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献



© 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



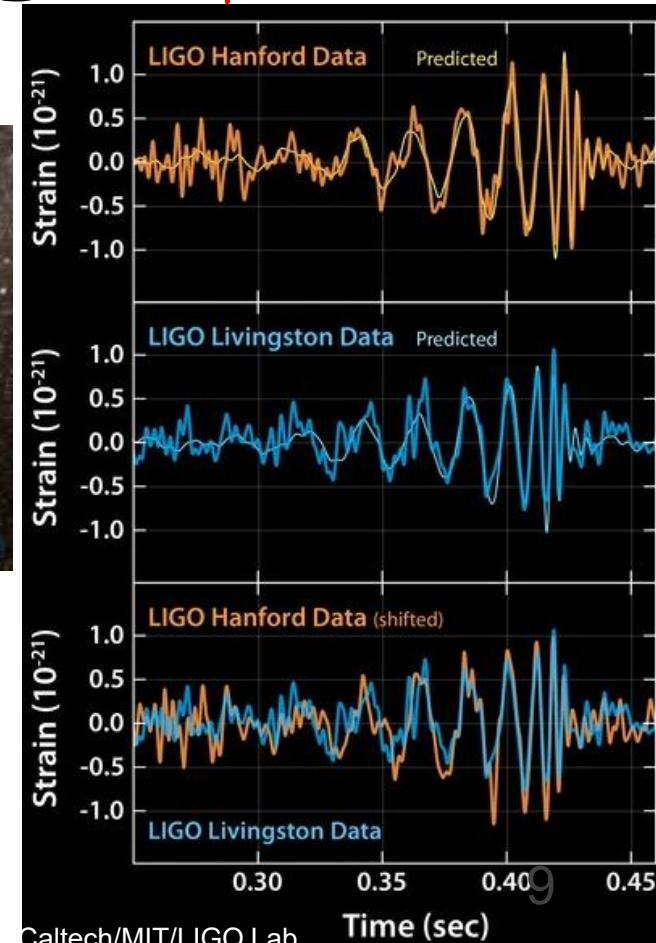
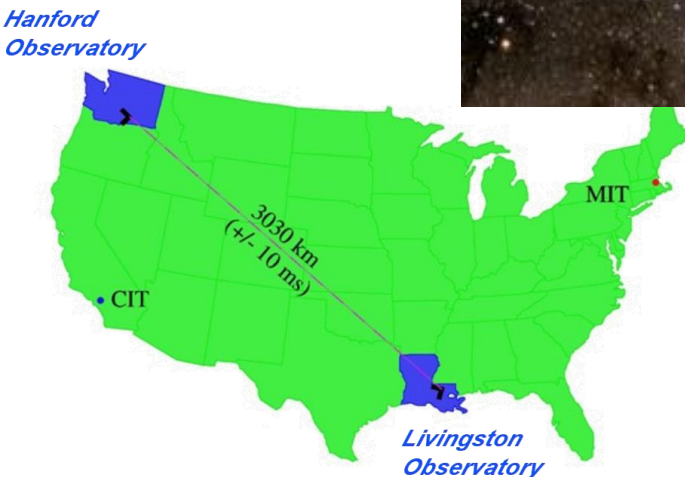
© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Kip S. Thorne

Prize share: 1/4

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/>

Caltech/MIT/LIGO Lab

聞こえてきた連星合体の音

SOUND OF GRAVITATIONAL WAVES

GW150914

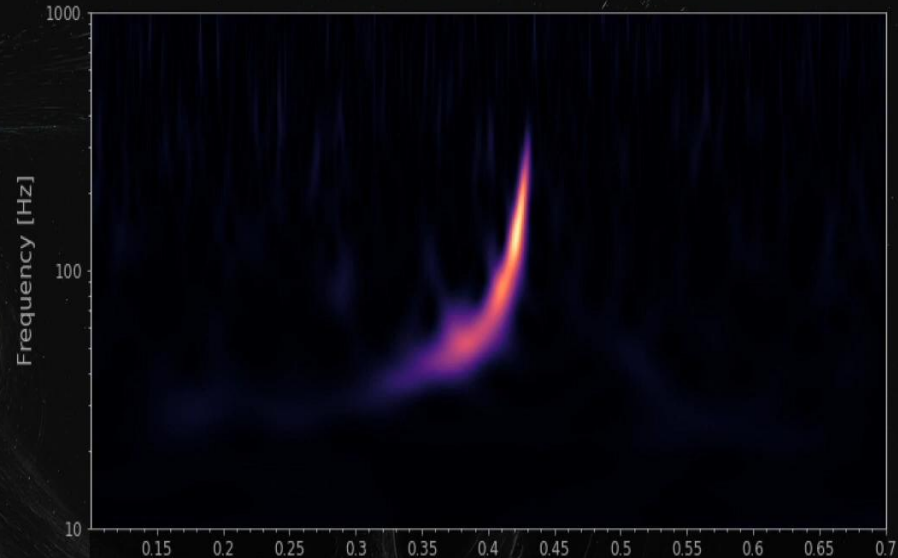
$35.6M_{\odot}$



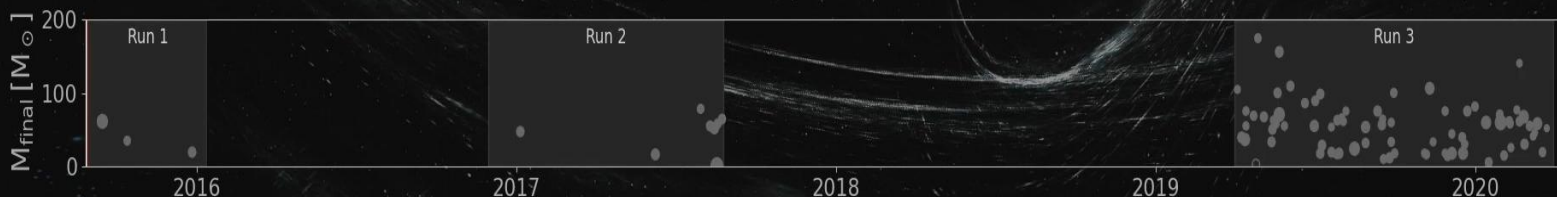
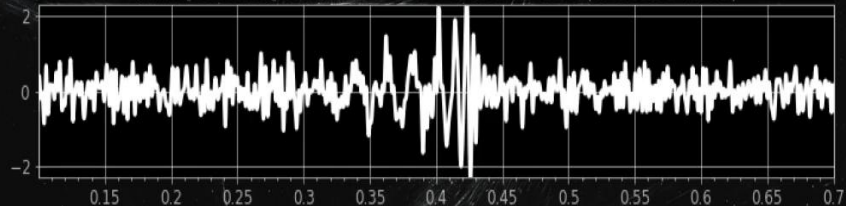
$63.1M_{\odot}$

$30.6M_{\odot}$

First detection, first black hole merger



Time [seconds] from 2015-09-14 09:50:45 UTC (1126259462.0)



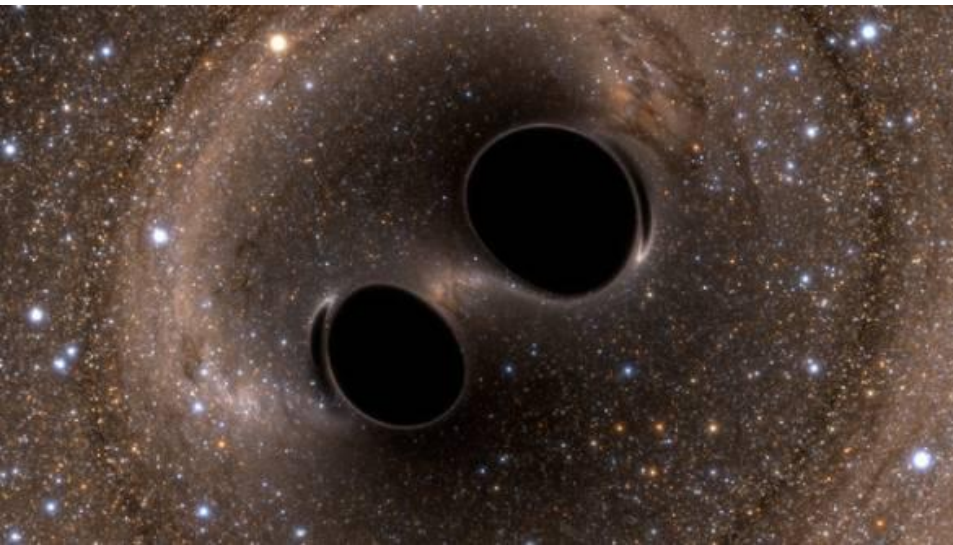
Audio signal to noise ratio exaggerated for clarity.

Time [year]

By: SYSTEM Sounds

今回のお話

- 重力波とは何か？
- なぜ重力波観測はおもしろいのか？
- 重力波をどうやって検出するのか？
- 大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)の紹介



アインシュタインの一般相対性理論

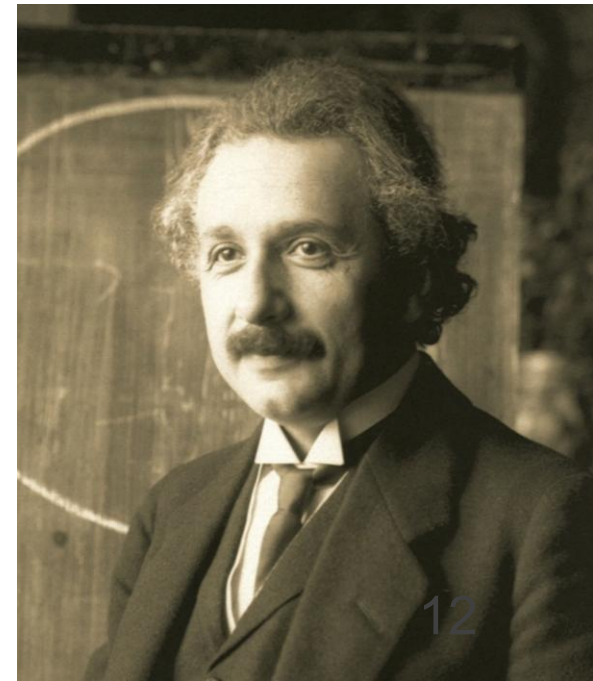
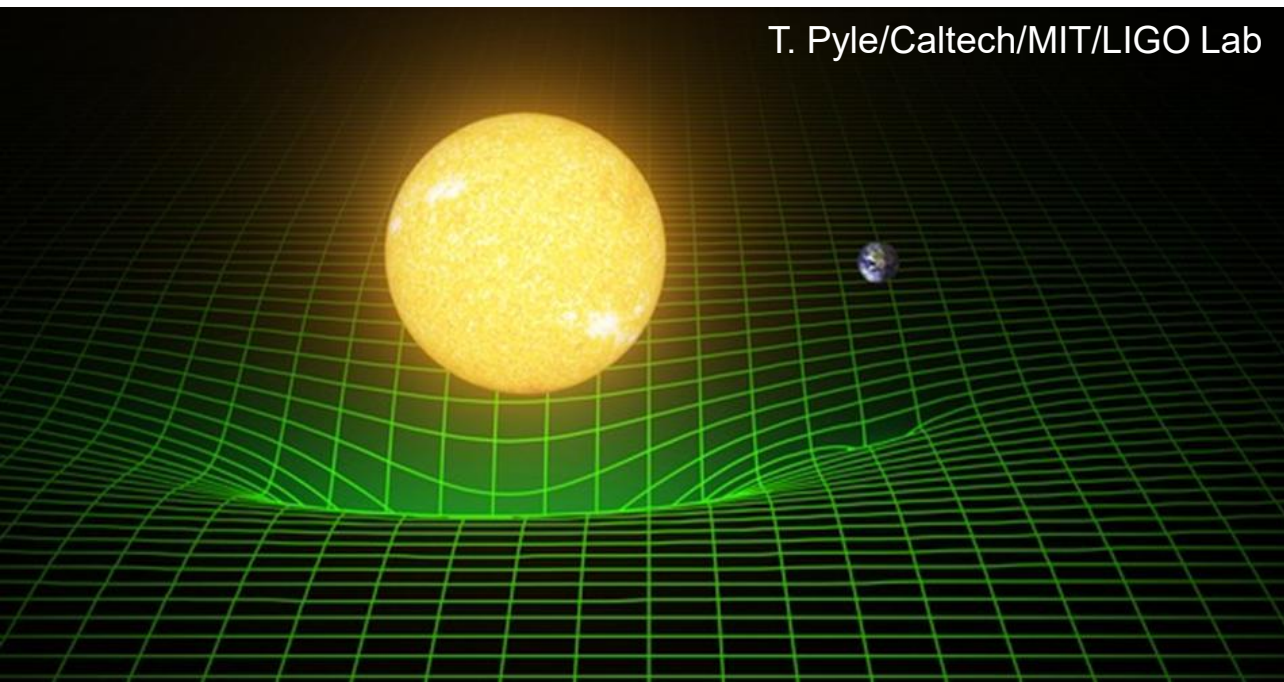
- 1915年にアインシュタインが発表
- 質量があると時空が**歪む**、
時空の歪みで物体の**動き**が変わる

c : 光速

G : 万有引力定数

アインシュタイン方程式 $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

時空の曲がり 質量の分布



一般相対性理論における重力

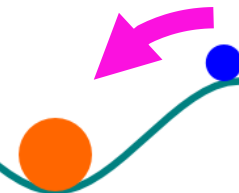
- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

なにもないトランポリンは平ら



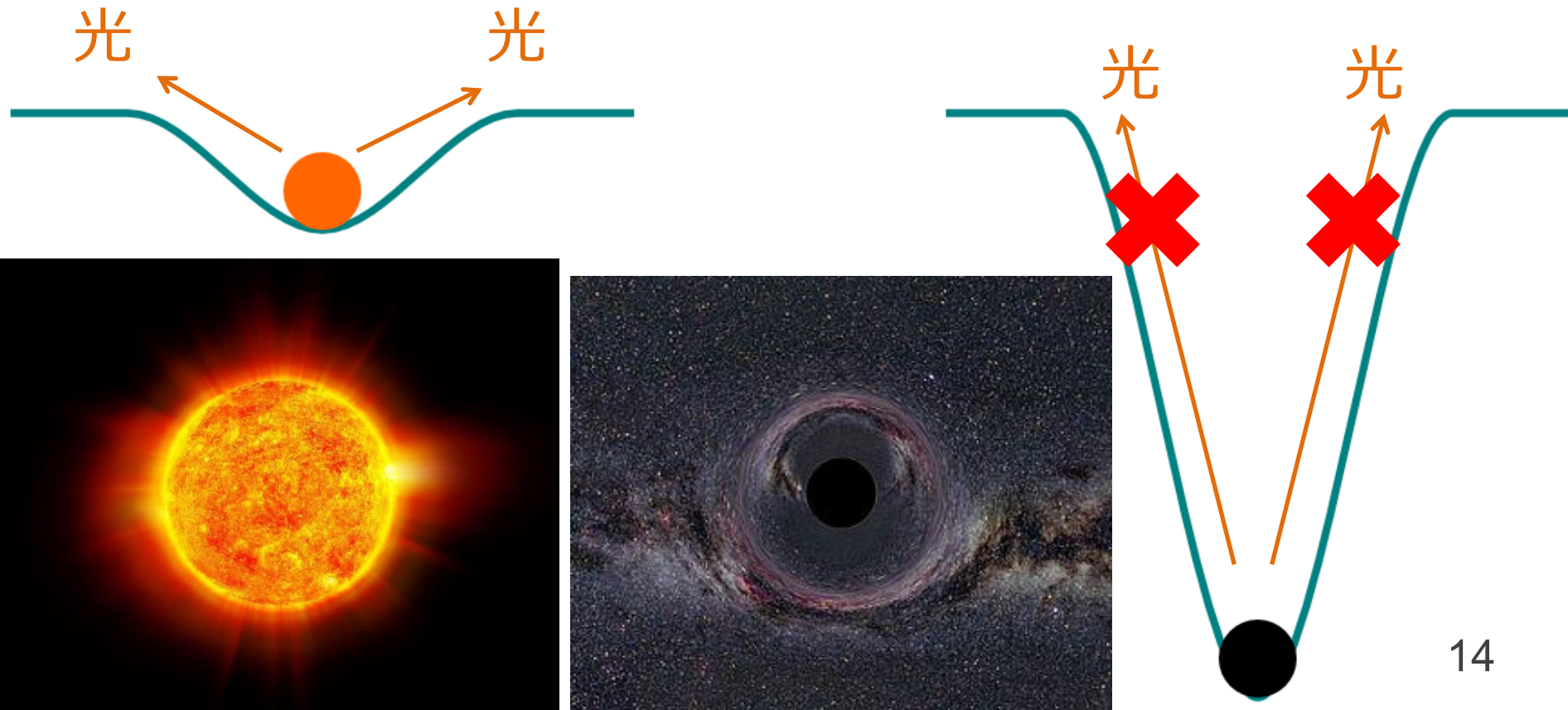
ボールを置くと
トランポリンが歪む

近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる



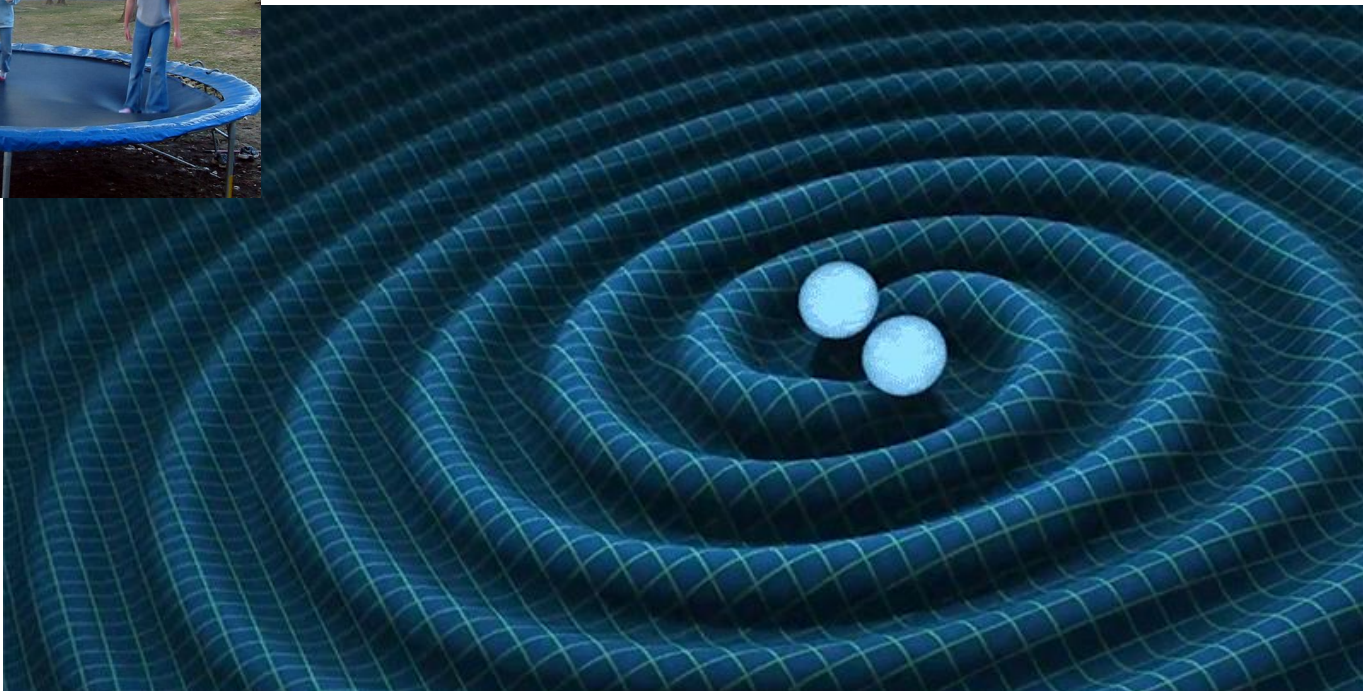
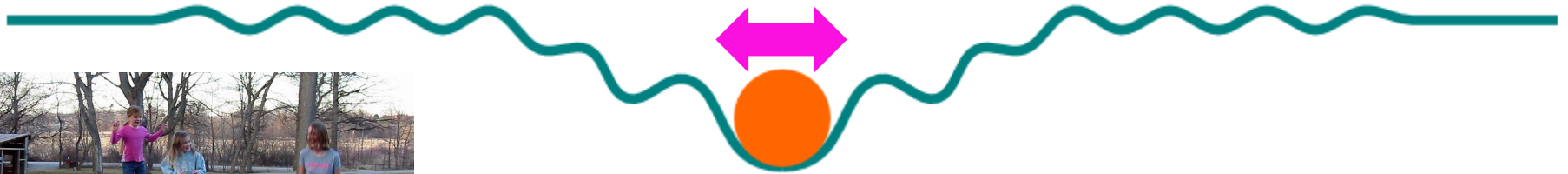
ブラックホール

- 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
光で直接見るができない天体



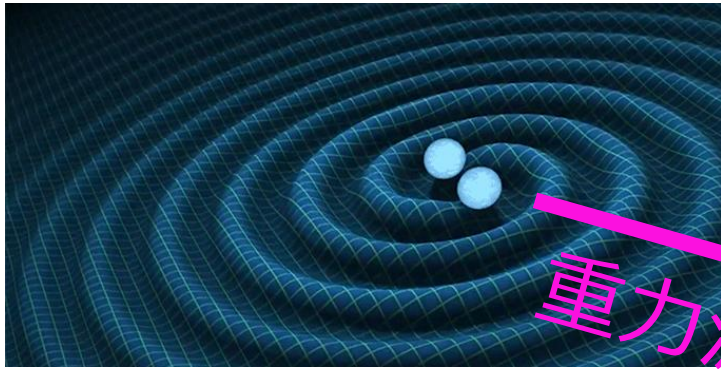
重力波は「時空のさざ波」

- 物体が動くと空間の歪みが変わり、光の速さで伝搬する → これが重力波
 - 2016年にアインシュタイン自身が導出
- 重力が伝わる速度は有限

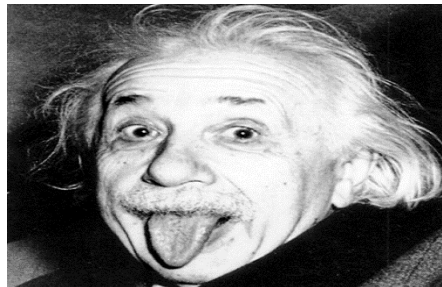
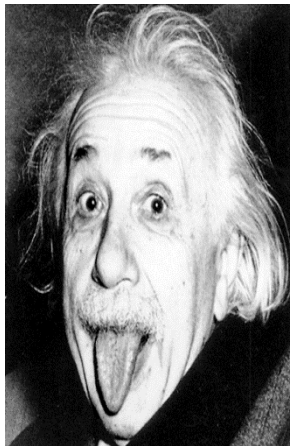
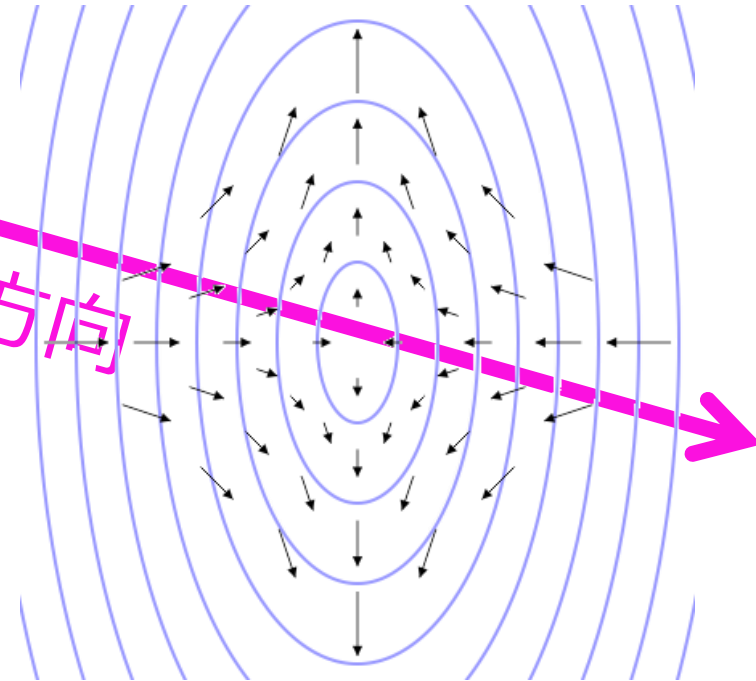


重力波の特徴

- 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)



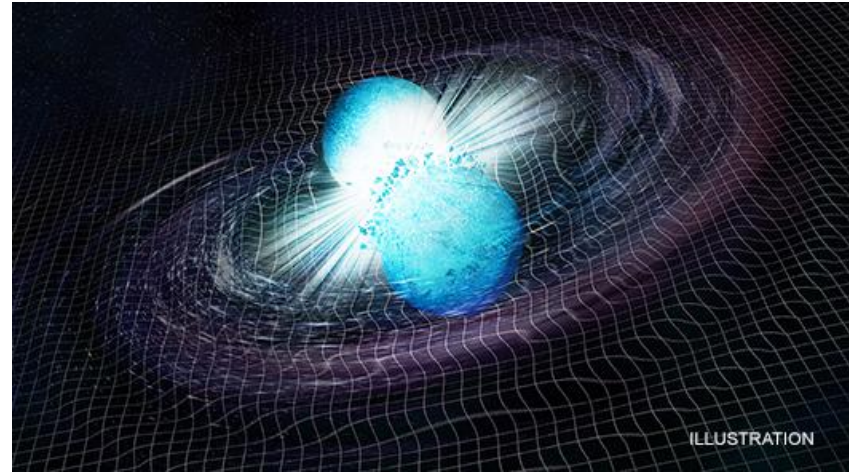
重力波の伝わる方向



重力波源となり得る天体現象

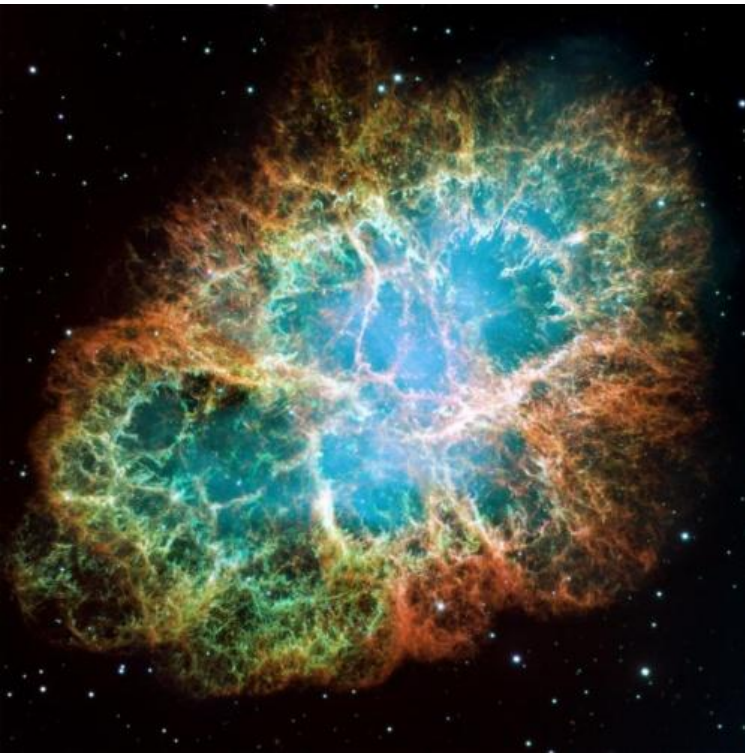
- とても重く、
とても速く動く天体

中性子星連星



ILLUSTRATION

超新星爆発



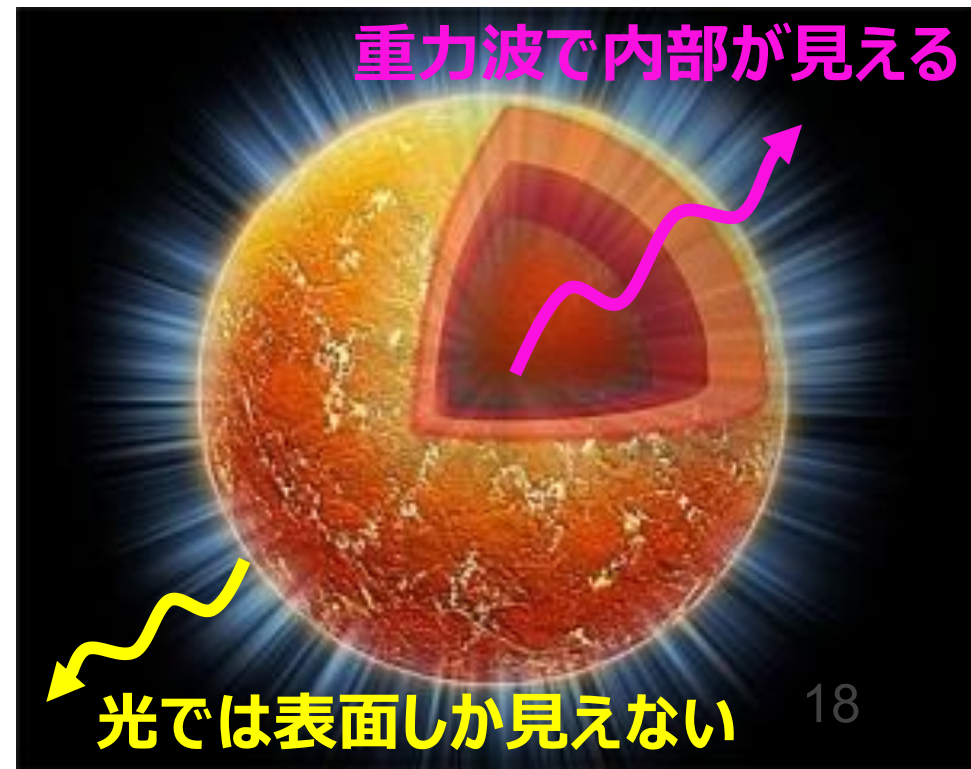
ブラックホール連星



重力波で何がわかる？

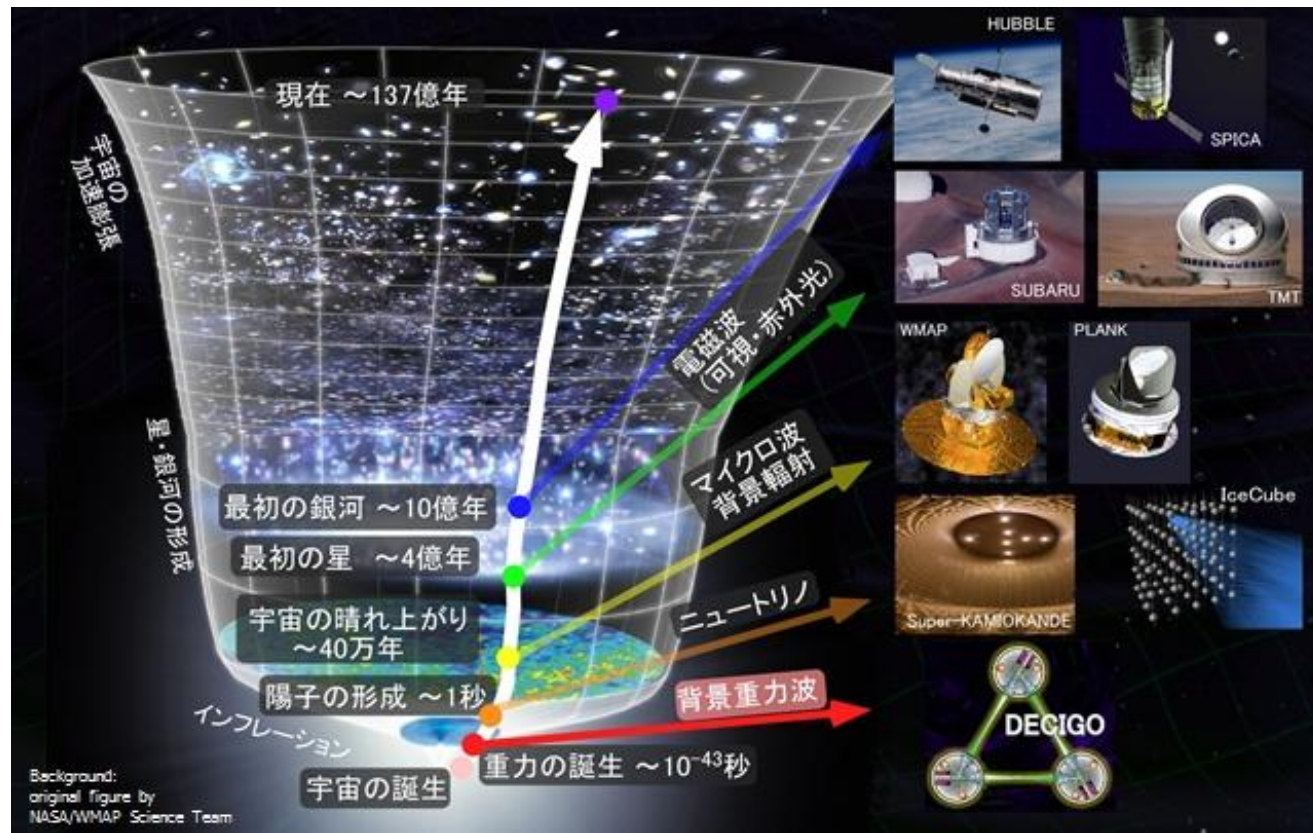
- 星の中を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- 光で見ることができない天体を見ることができる
ブラックホール、ダークマター、未知の天体？

スイカを叩いたときの音から
中身がわかるのと似ている



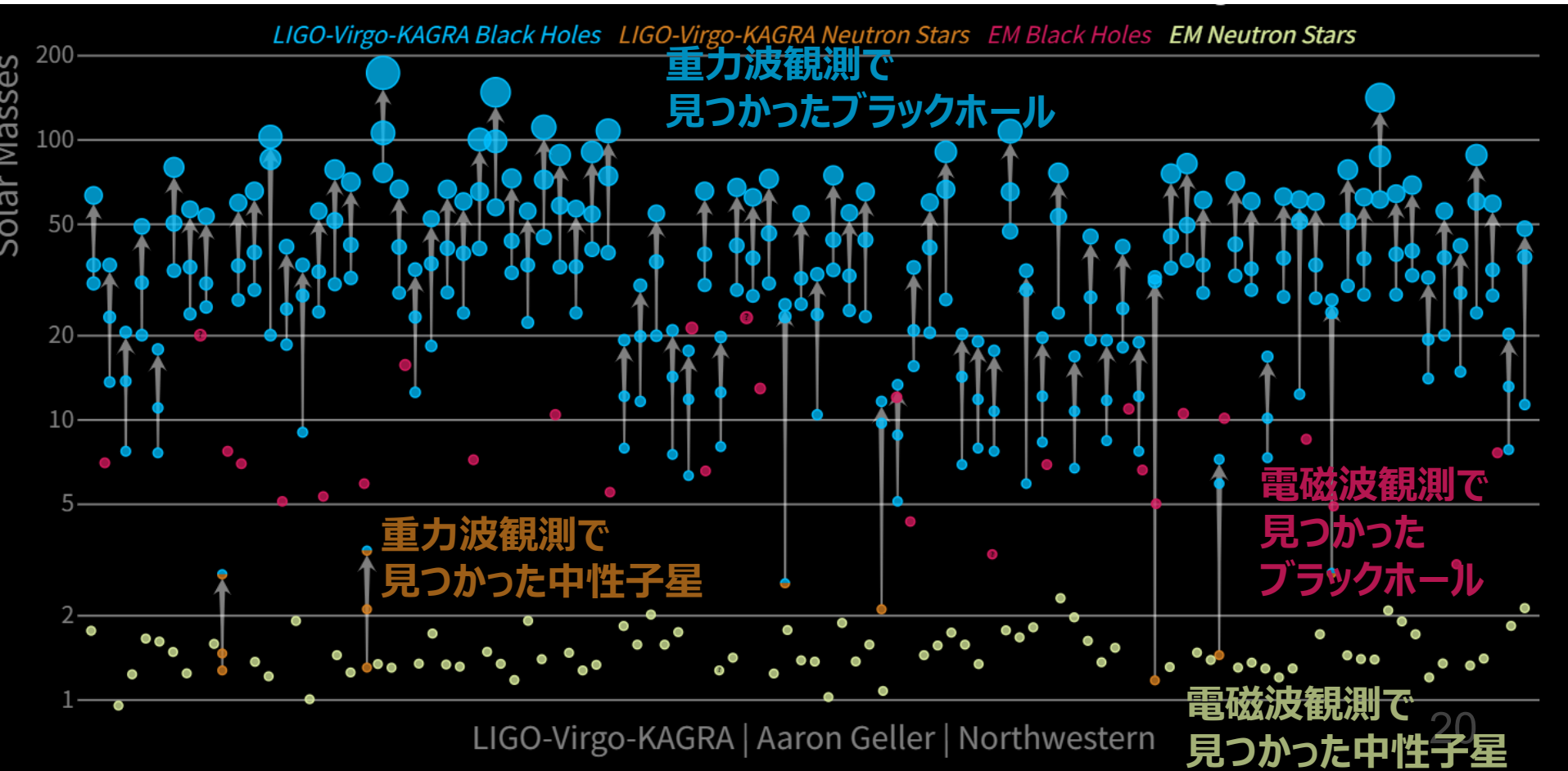
背景重力波

- 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
→宇宙重力波望遠鏡 DECIGO(でさいご) 計画



これまで見つかったブラックホール

- これまでの観測では見えなかった
重いブラックホールを重力波で次々と検出



これまで見つかったブラックホール

銀河中心にある
超大質量ブラックホール
(~ 10 万太陽質量程度以上)



重いブラックホールを次々と検出

起源不明の中間質量ブラックホール
(~ 100 太陽質量程度以上)

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars

重力波観測で
ブラックホール? ($65-130$ 太陽質量程度)



星の重力崩壊で生まれる
恒星質量ブラックホール
($5-65$ 太陽質量程度)

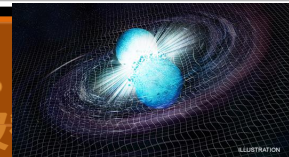


電磁波観測で

重力波観測で
?????? ($3-5$ 太陽質量程度)

見つかった
ブラックホール

中性子星(~ 2 太陽質量程度以下)

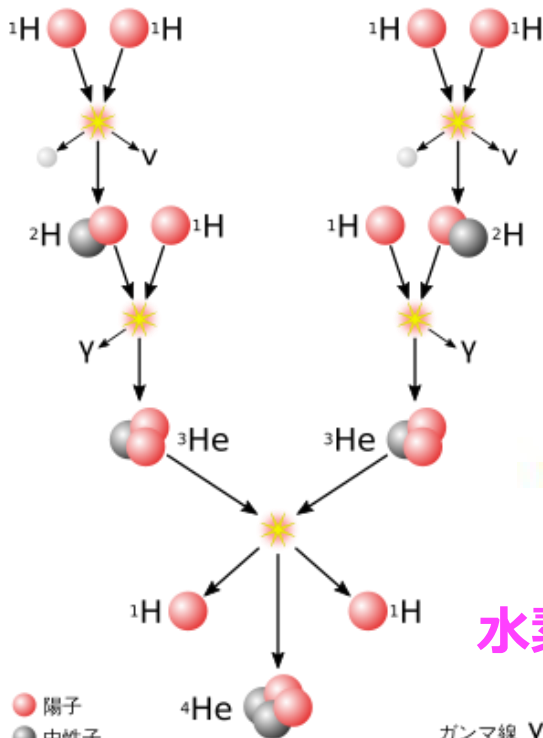
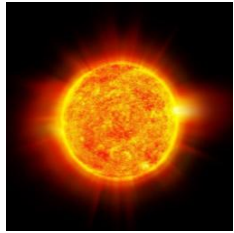


LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

電磁波
見つかった中性子星

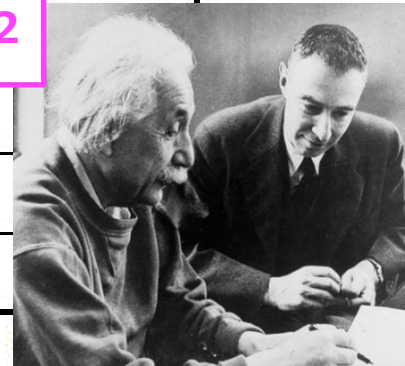
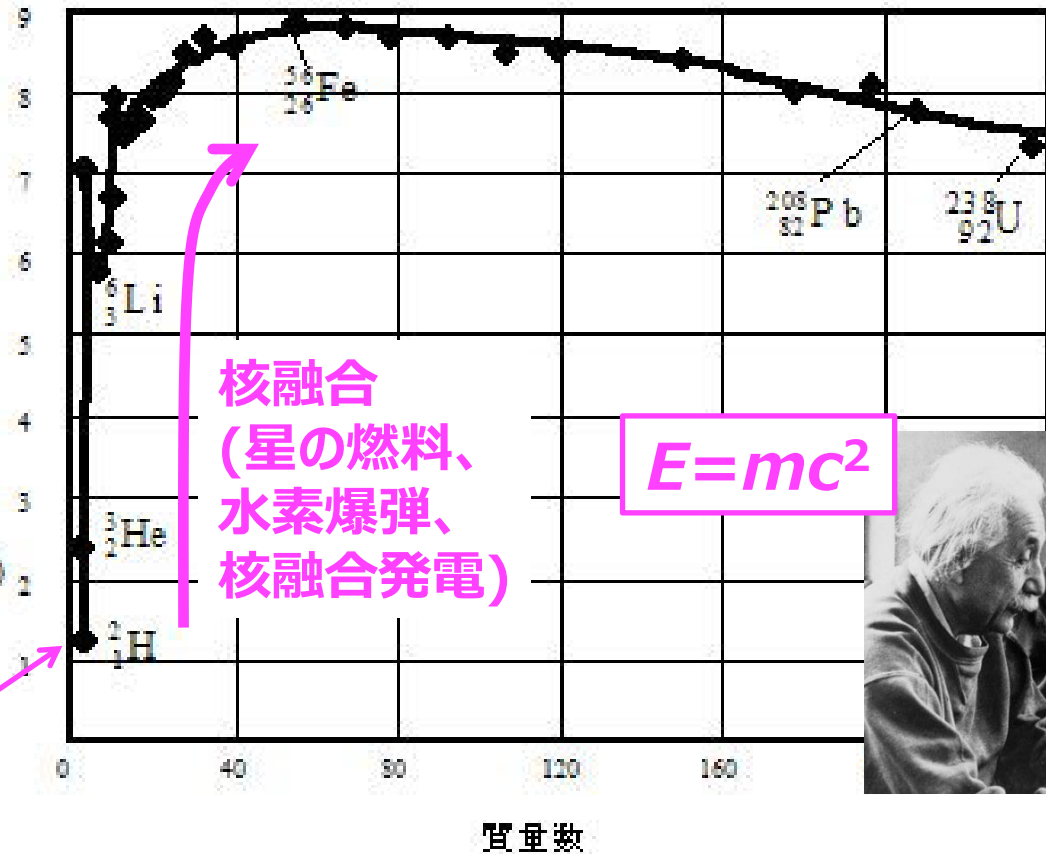
星はなぜ光るのか？

- 星は**核融合**で光っていて、重力を支えている
- 燃料がなくなると、**重力崩壊**する



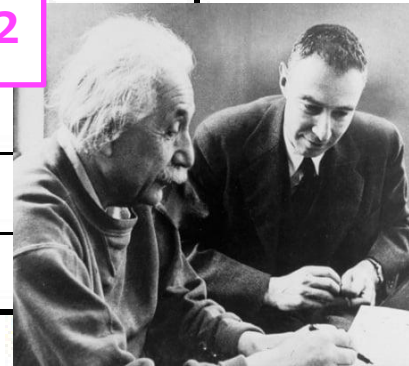
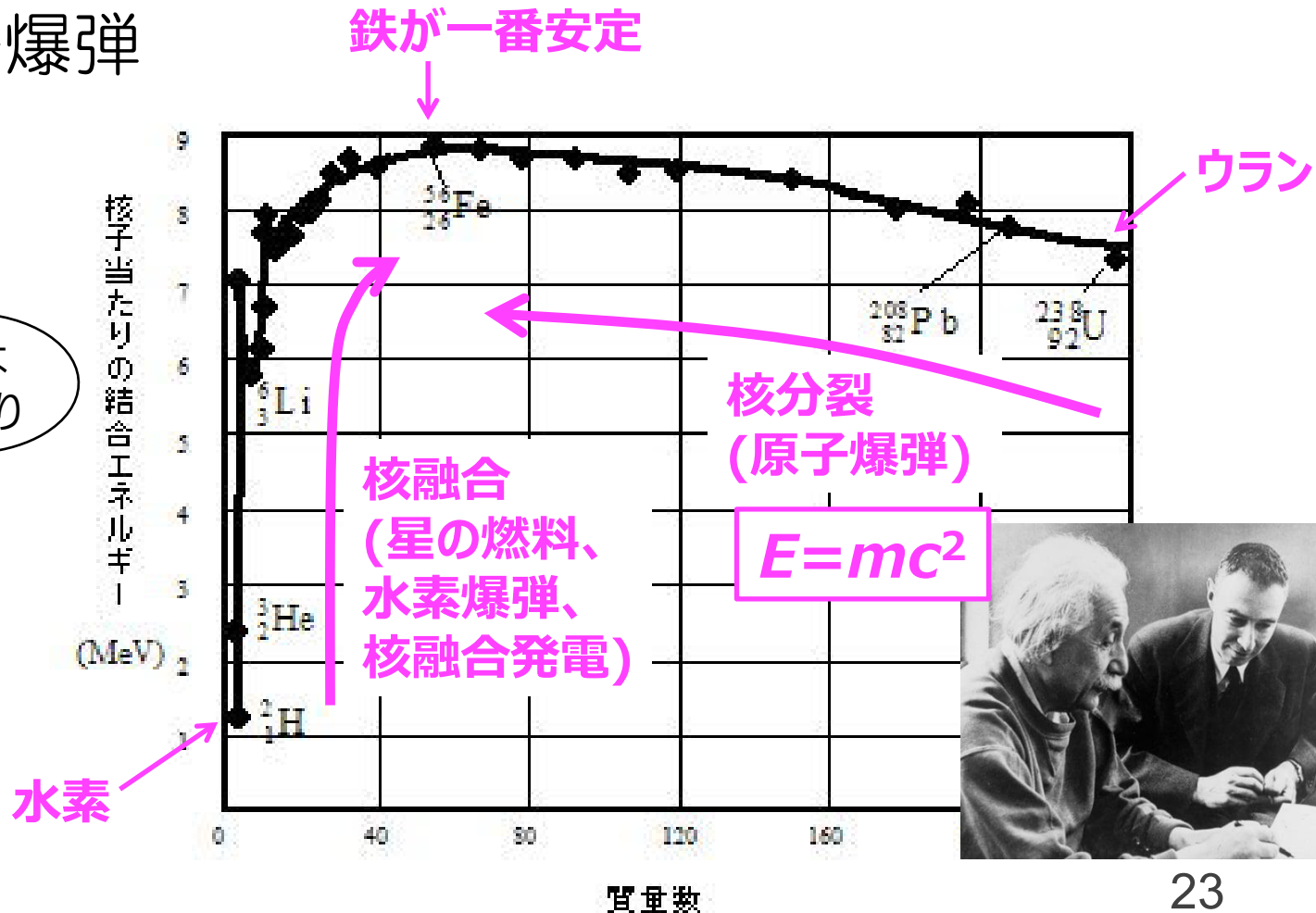
水素

核子当たりの結合エネルギー (MeV)



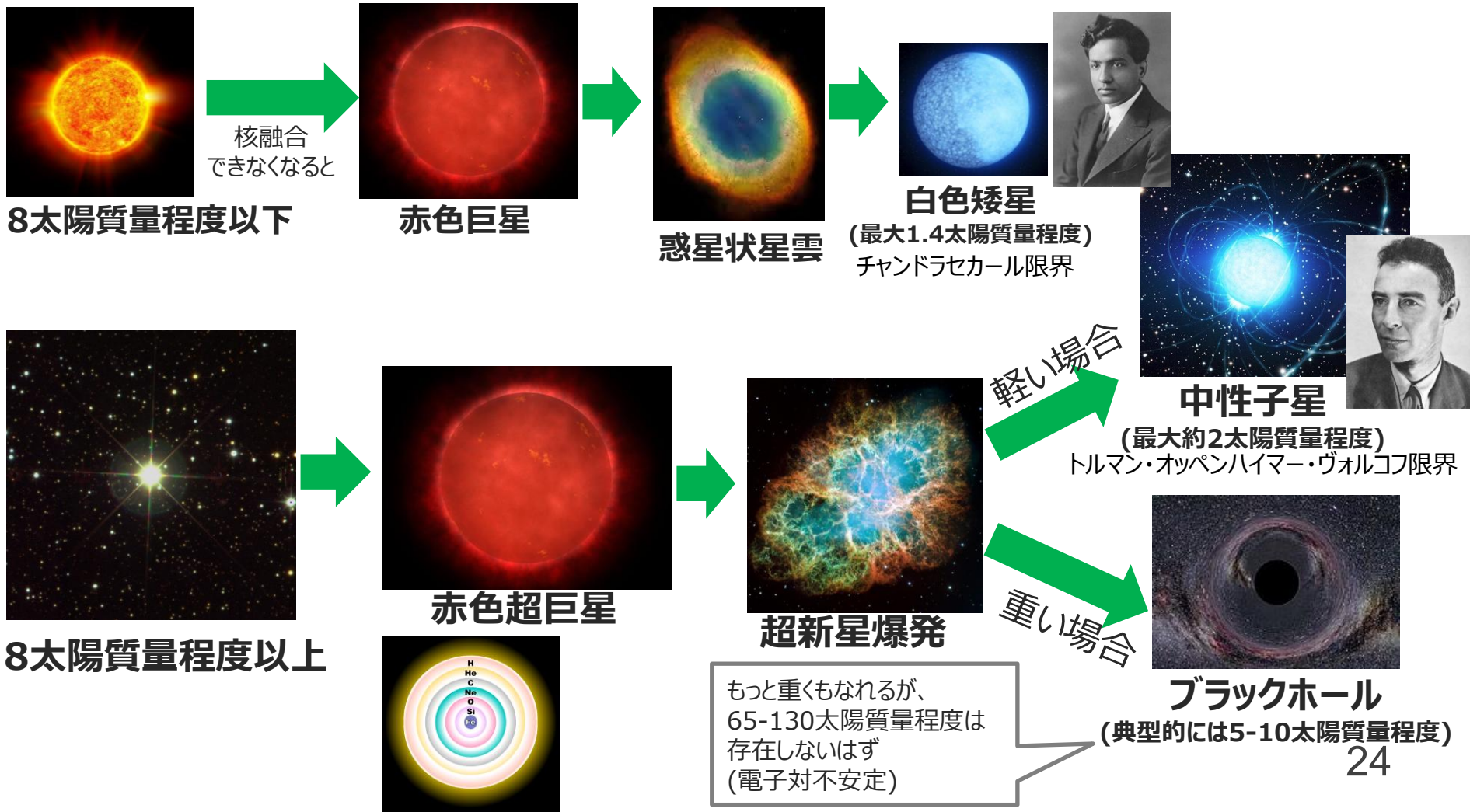
核融合と核分裂

- 重力崩壊で鉄より**重い元素**ができる
- 重い元素の**核分裂**でエネルギーが取り出せる
→原子爆弾



重い星の一生

- 存在しないはずの質量のブラックホール
→ 合体を繰り返してブラックホールが成長？

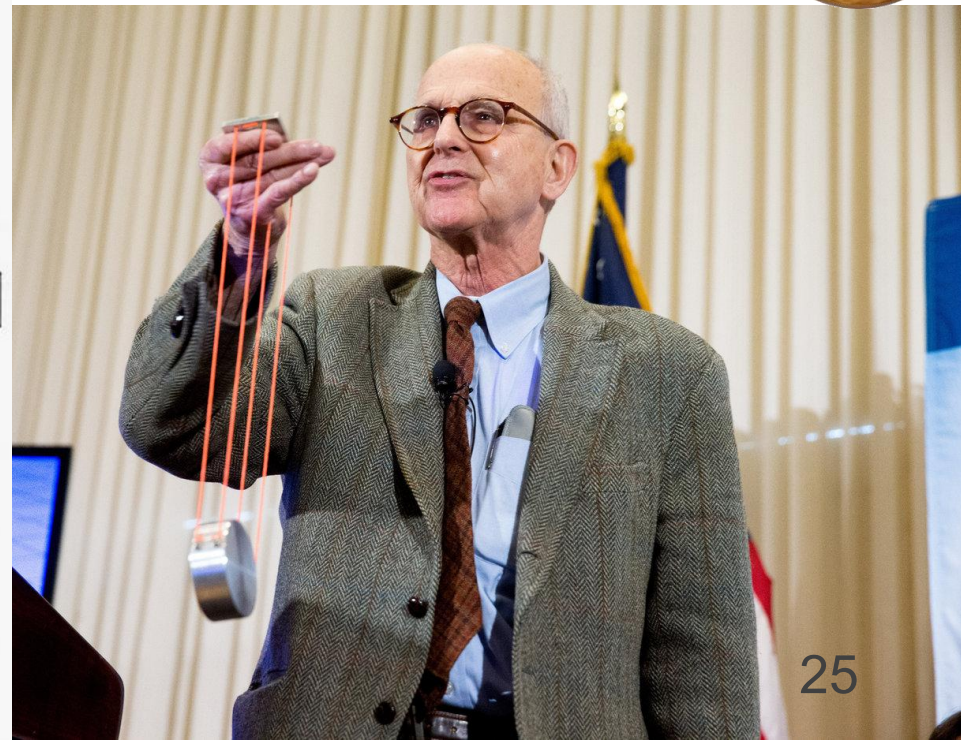
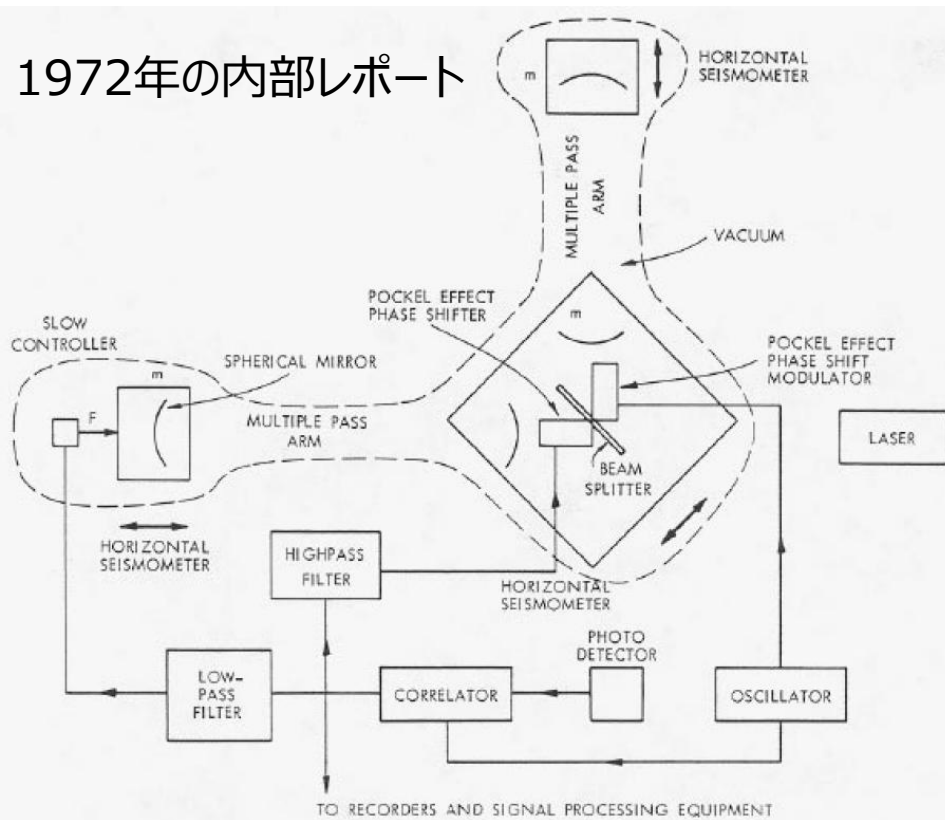


重力波はどう検出するか？

- 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

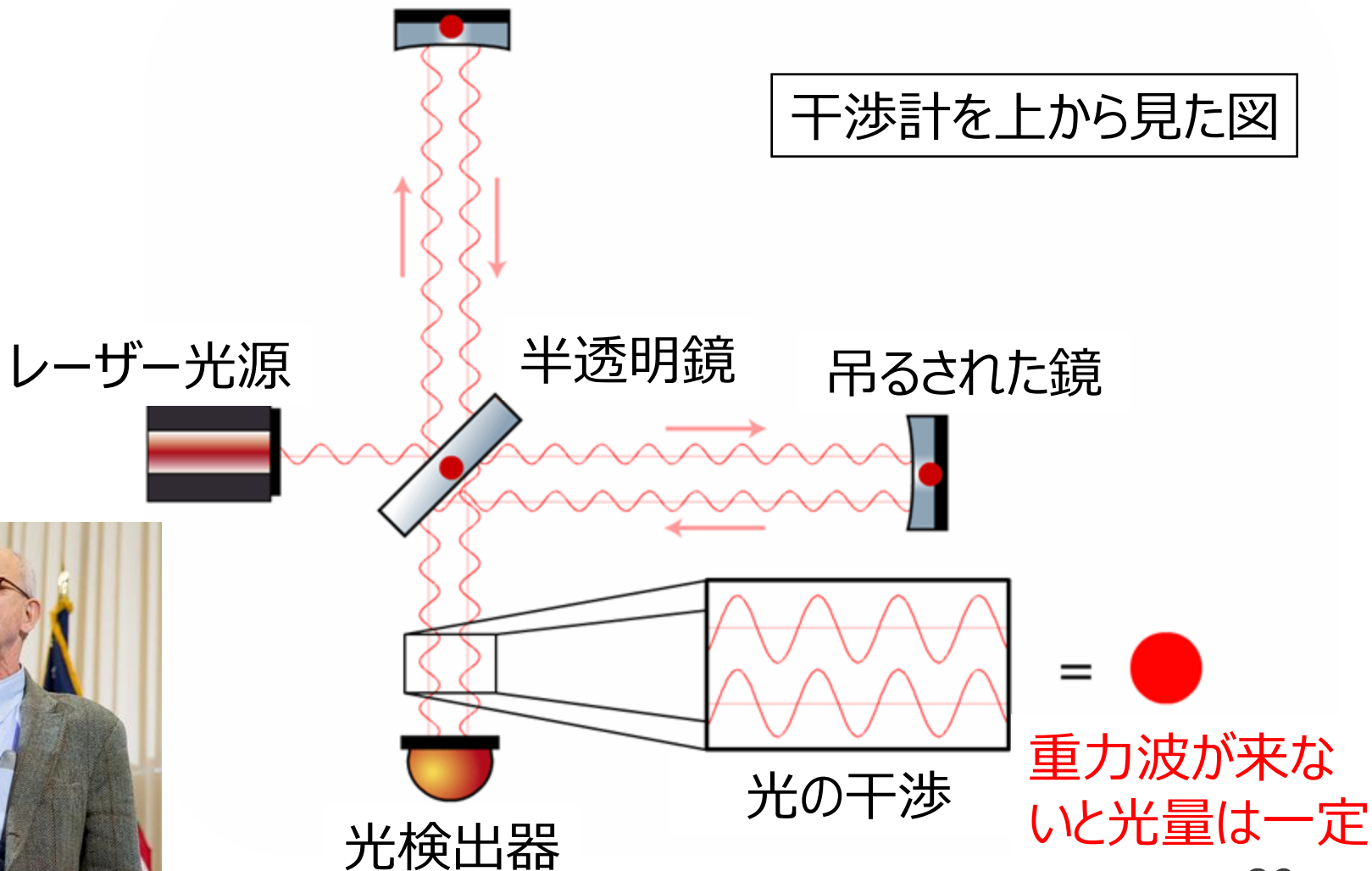


2017年ノーベル物理学賞



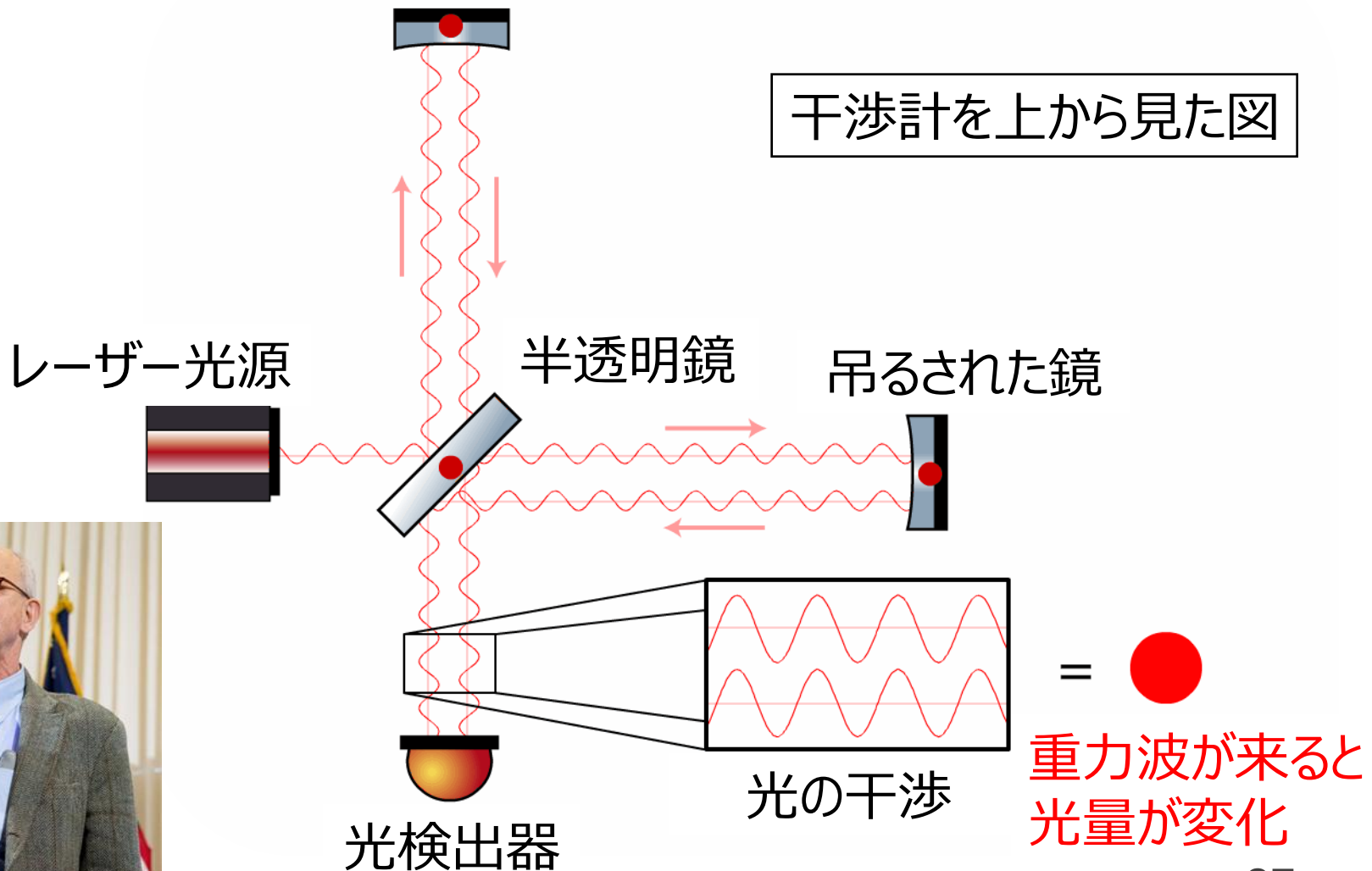
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



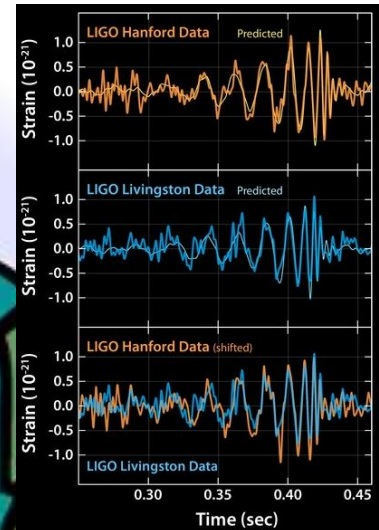
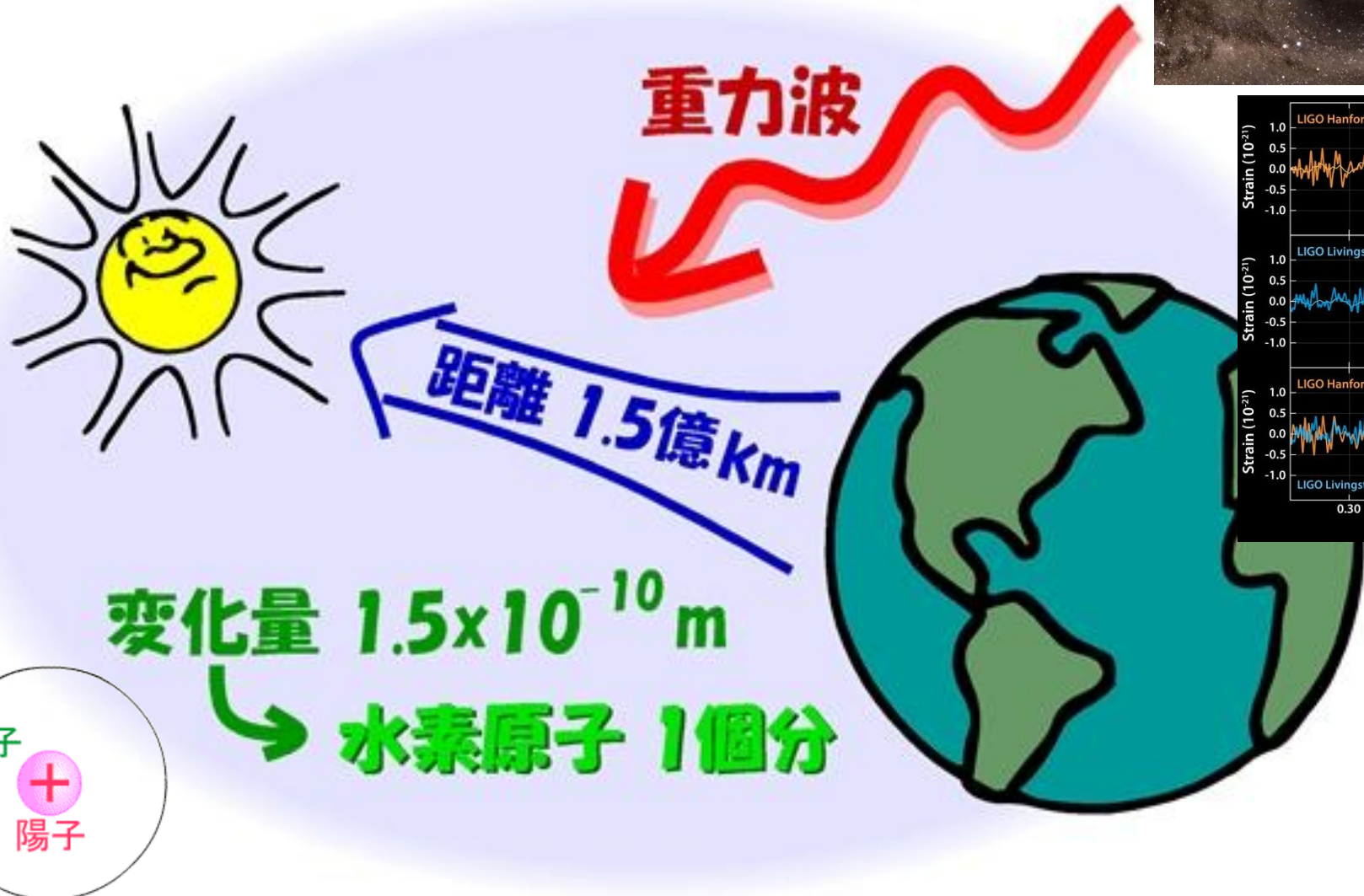
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



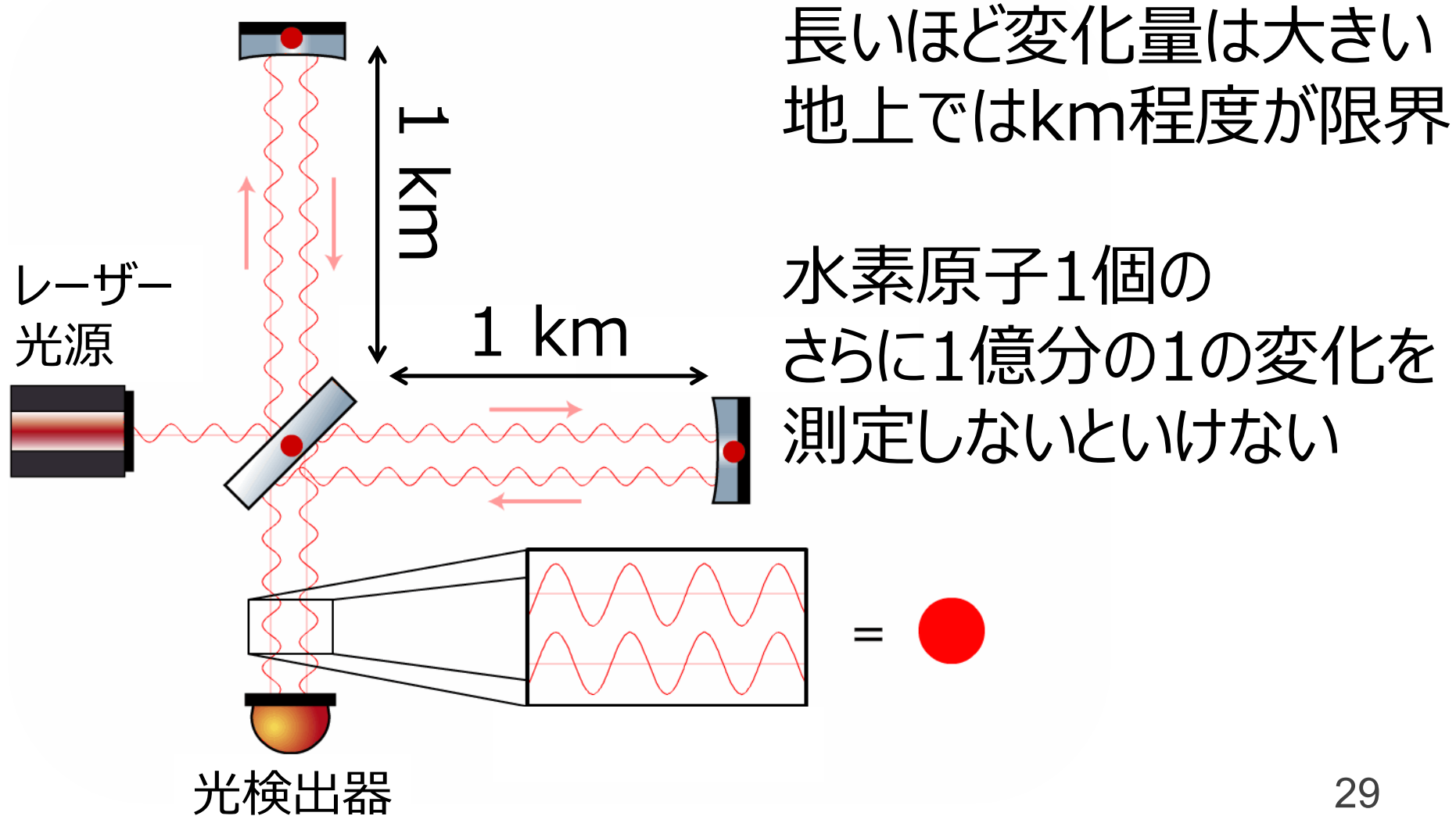
重力波の振幅はどれくらい？

- 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



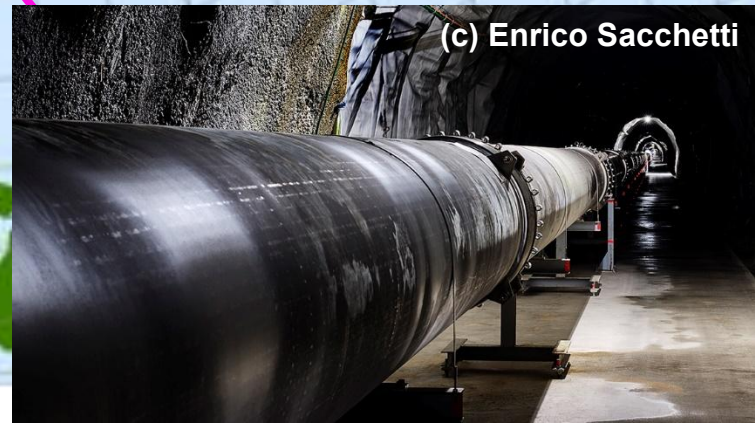
Advanced Virgo



LIGO-India (approved)



KAGRA



Advanced LIGO



Advanced LIGO



(c) Enrico Sacchetti

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



2025年8月の
コラボレーション会議

KAGRAの行き方



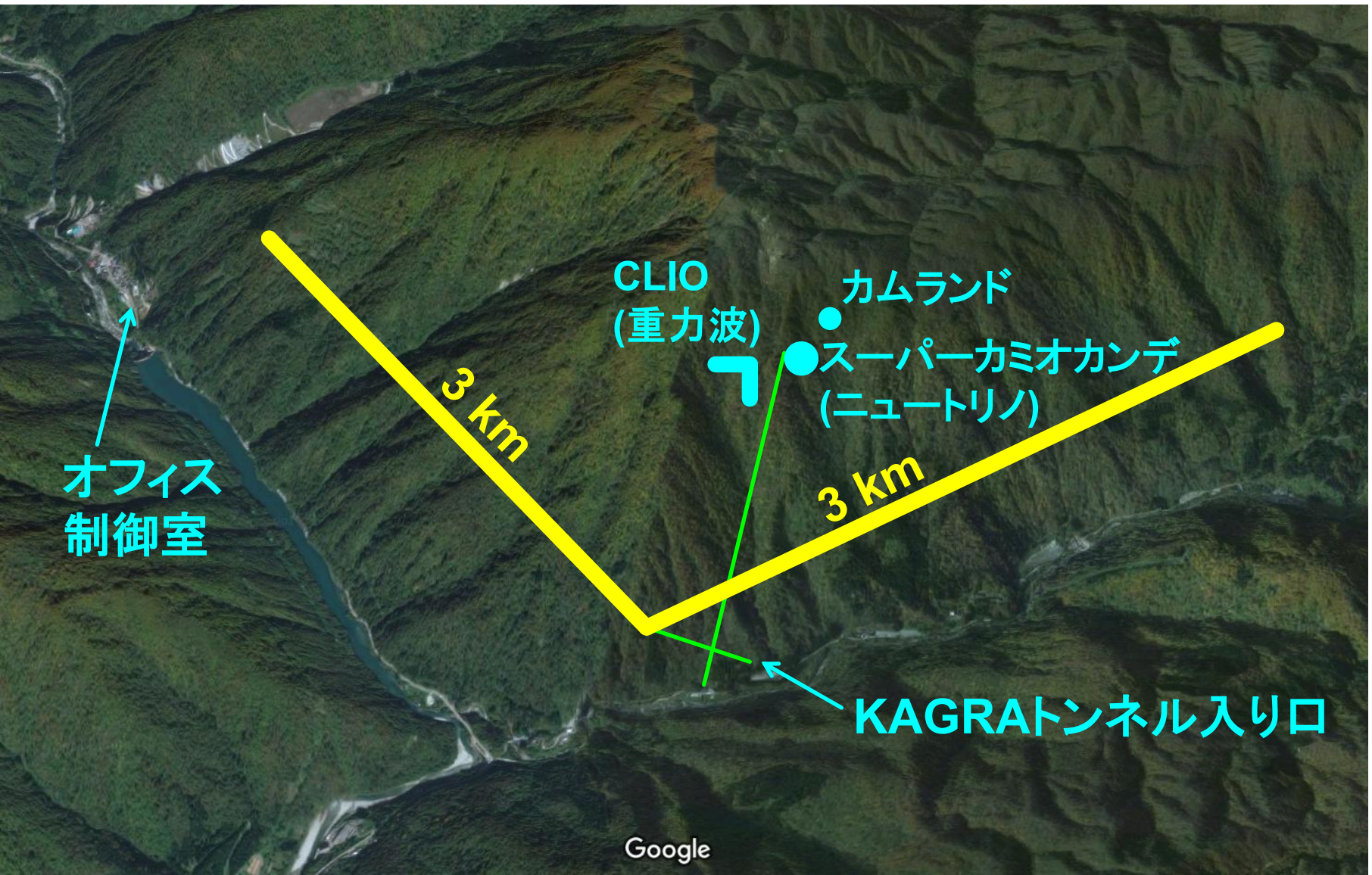
東京から新幹線で最速2時間5分



富山駅から
電車+バスで約2時間
(車で約1時間)

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

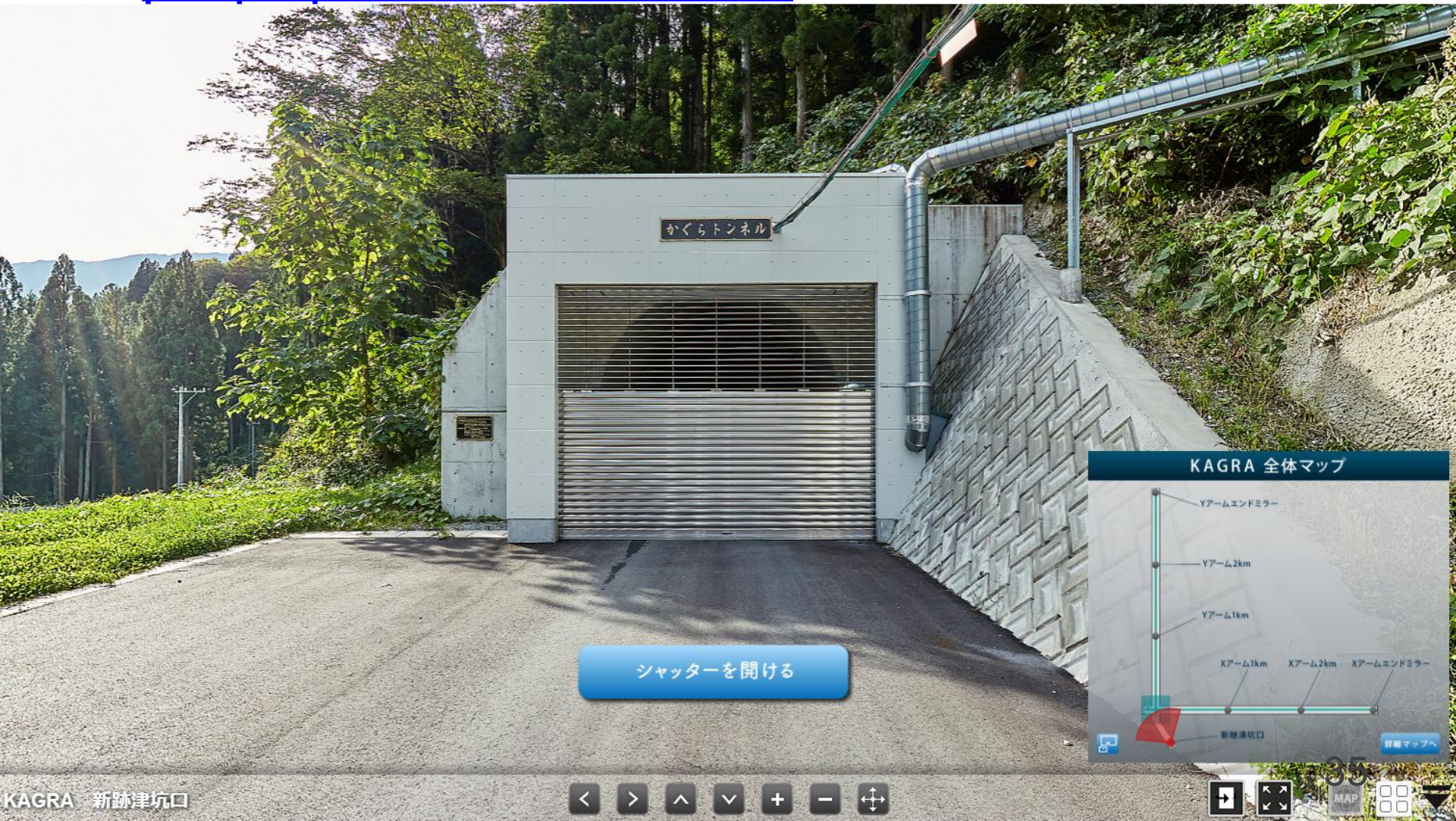


新跡津坑口
(2016.2.8)



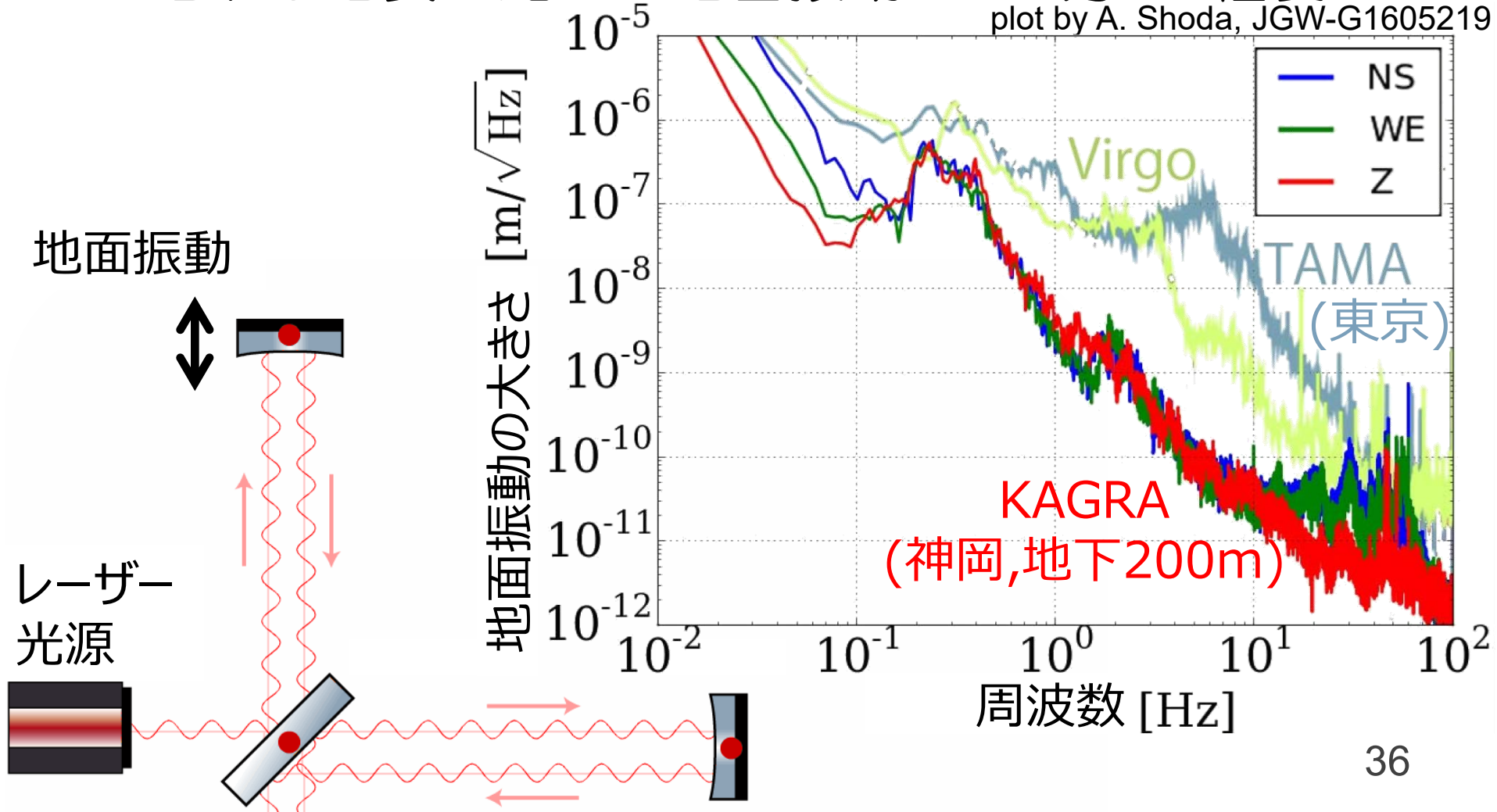
宇宙線研究所VR

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



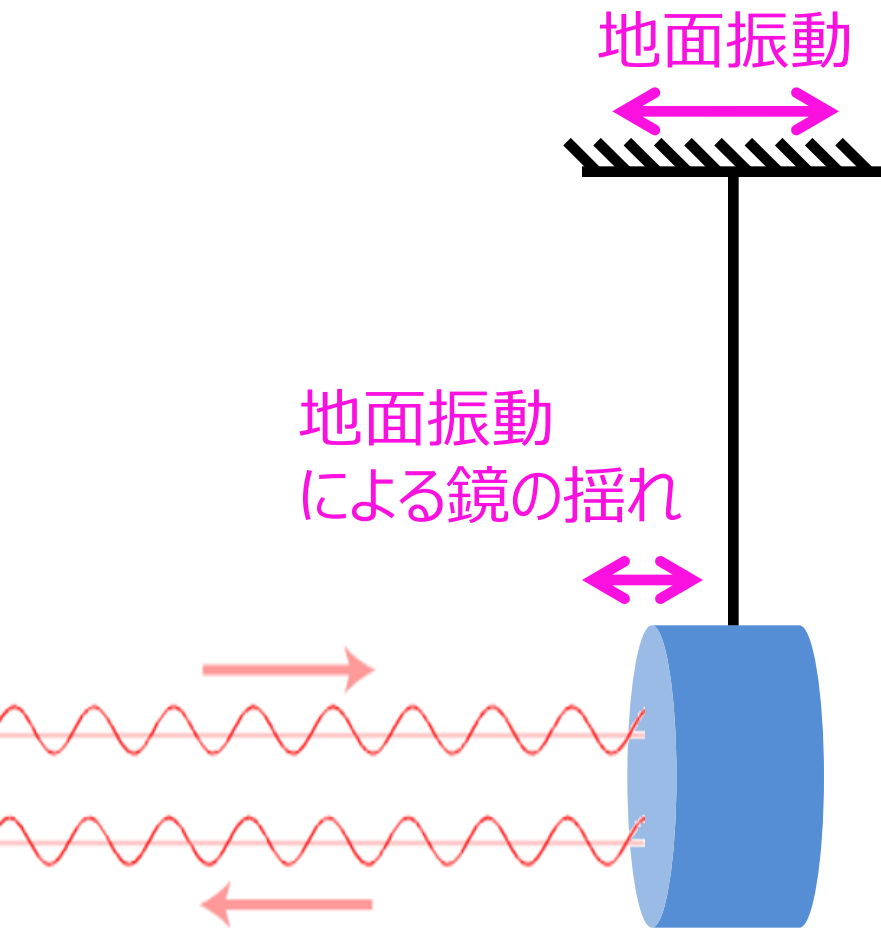
地下建設で地面の揺れを低減

- 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



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)



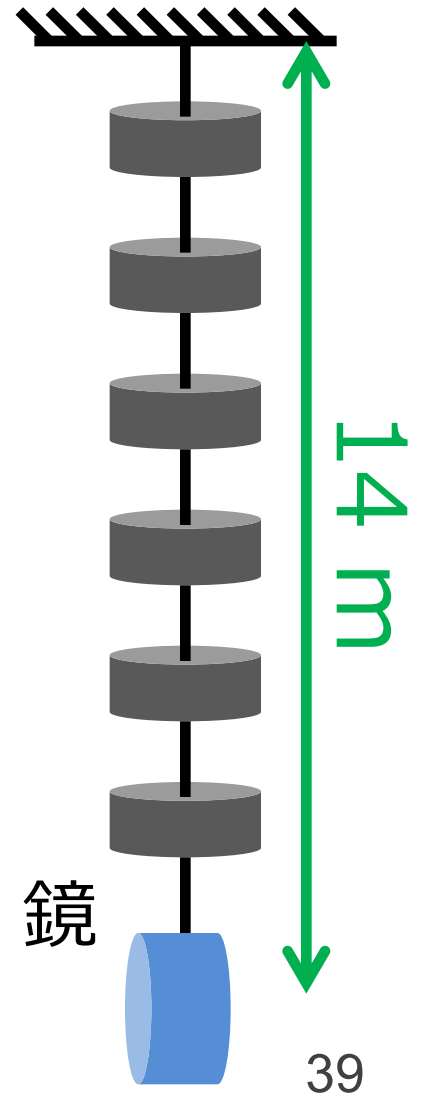
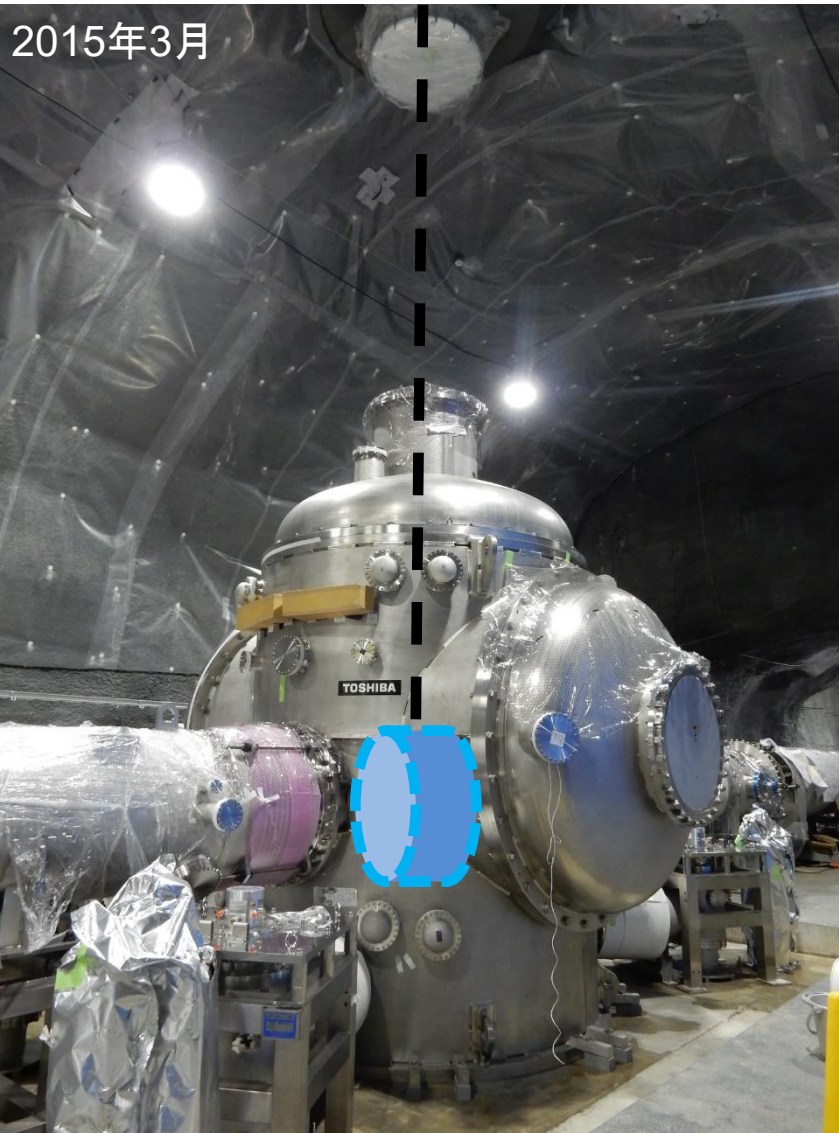
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



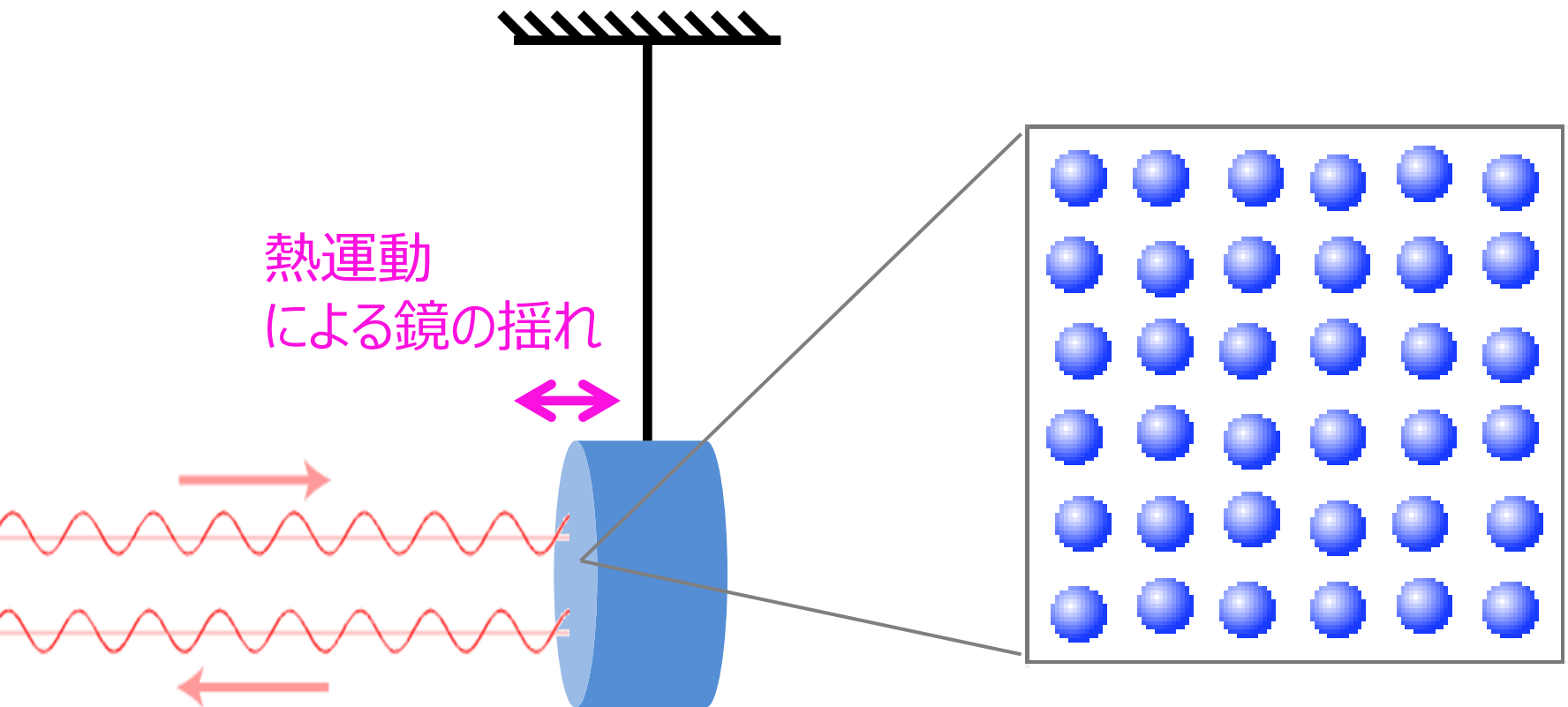
KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

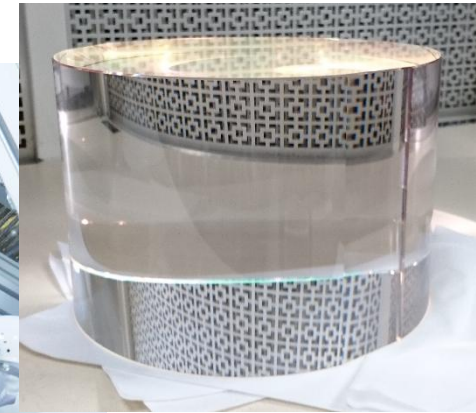
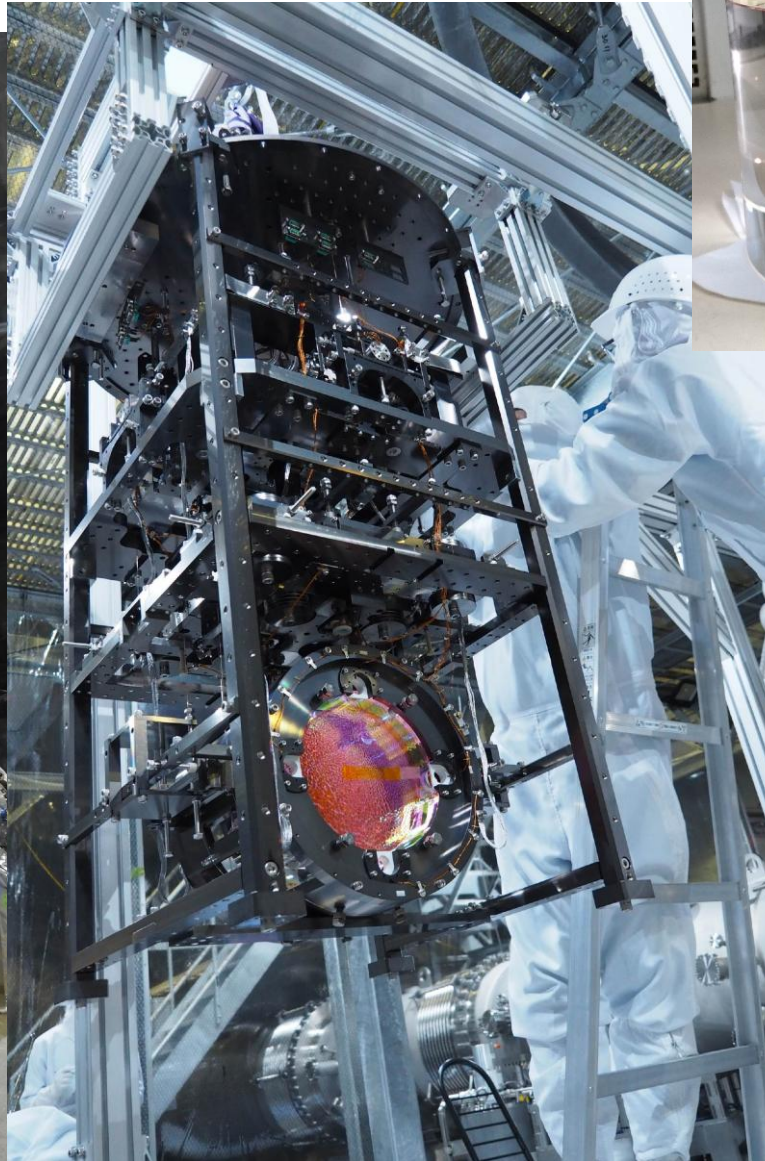
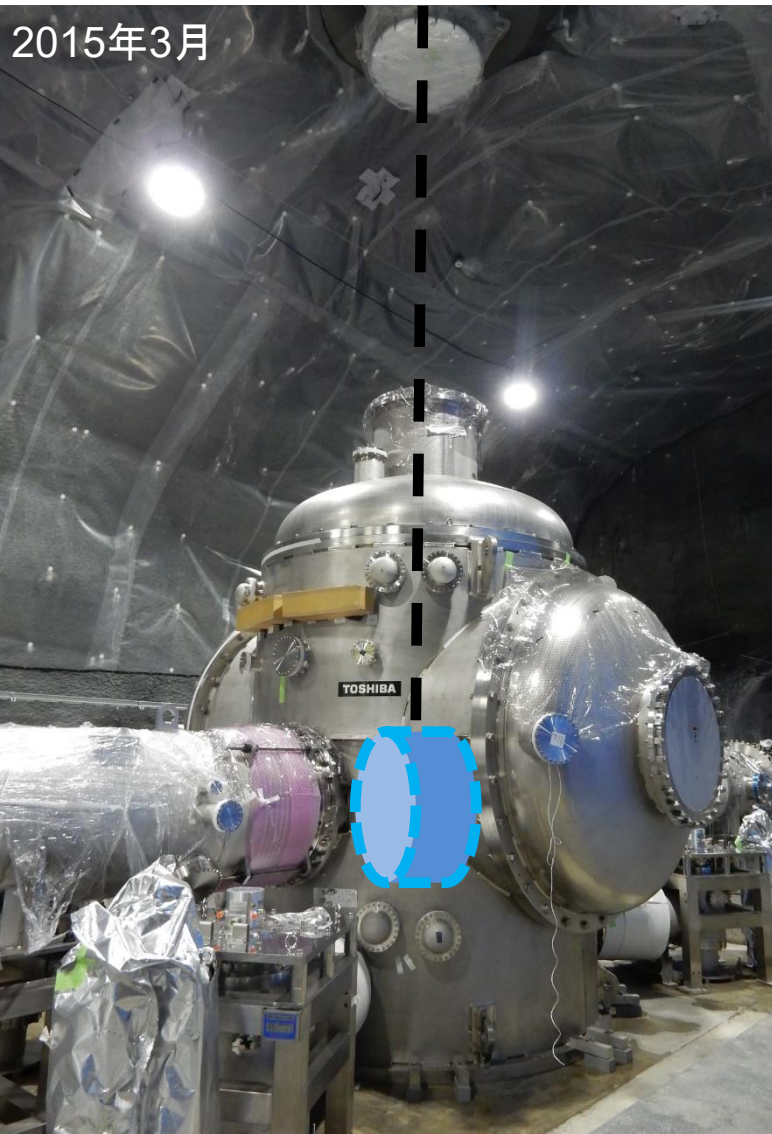


鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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



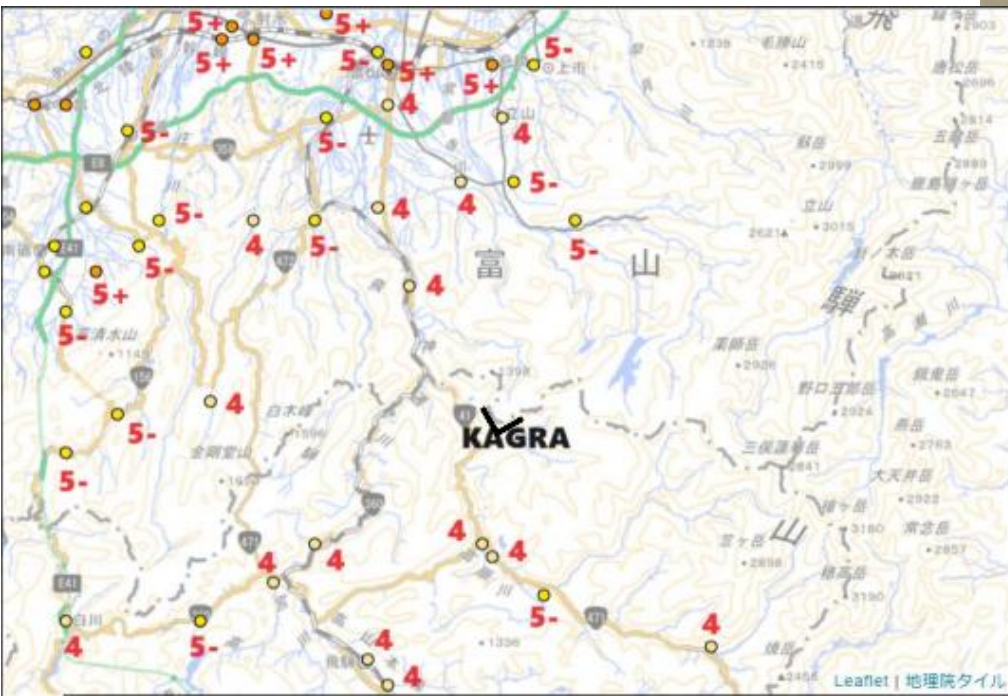
KAGRAの低温懸架装置



サファイア鏡
直径 22 cm
厚さ 15 cm

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)
- 2025年6月に感度を約5倍にして観測再開、重力波信号の初検出を目指す



観測再開祈願 KAGRA

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

夢と希望の場所KAGRA再開へ！
感謝してます！頑張ろう！

NPO法人 宇宙まるごと創生塾飛騨アカデミー
飛騨市民から研究者の皆様へ
時空の窓みで宇宙を暴く
大型低温重力波望遠鏡
KAGRA
観測再開祈願応援メッセージ

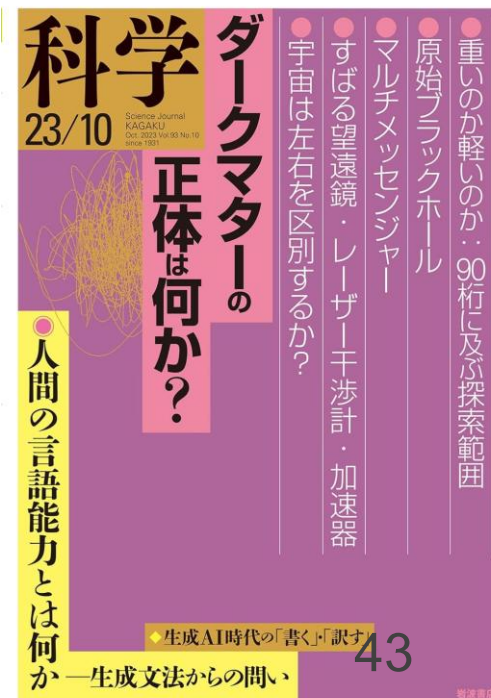
地元神岡のチームメンバーとしてKAGRAプロジェクトの
一員として活動しています。KAGRAプロジェクトの
活動を通して、地元神岡の発展に貢献したいと考えています。
KAGRAプロジェクトの活動を通して、地元神岡の発展に貢献したいと考えています。

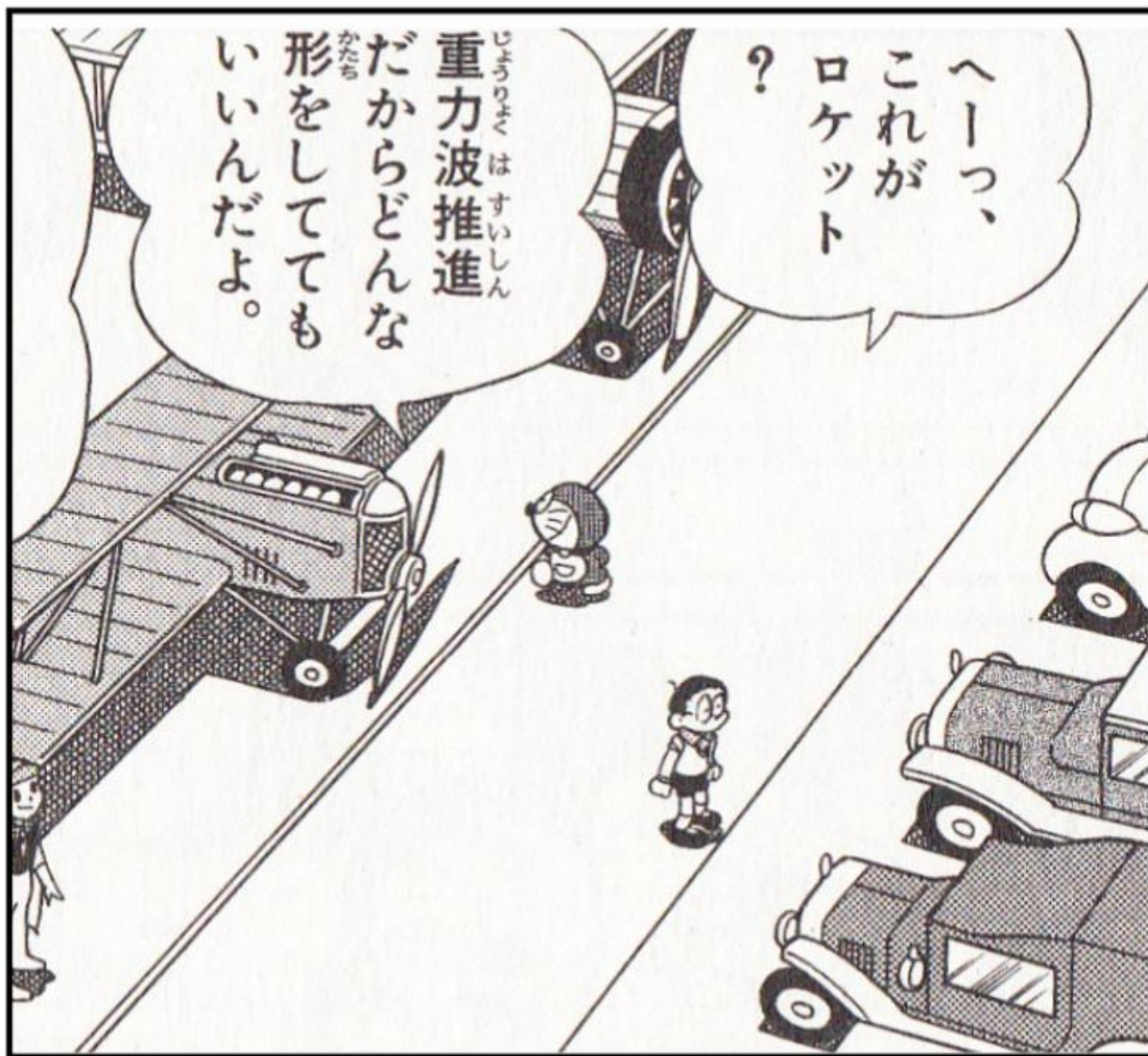
地震に負けるな！KAGRA
復活の日を皆で待っている
頑張ろうKAGRA！
さらなる進化を遂げた復活を！！

神岡中学校

KAGRAのこれから

- 重力波をLIGO、Virgoとともに複数台で観測することで、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
- 重力波の偏極を用いて**一般相対性理論の検証**、**新しい重力理論**の検証もできる
- **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





まとめ

- 2015年、ついに重力波が初検出された
- その後も重力波を続々と検出
- 人類は、宇宙を観測する「目」に加えて、「耳」を手に入れた
- 予想より重いブラックホールなど、新しい天体が見つかってきた
- KAGRAによって、今後も謎の解明や、新しい謎の発見が期待される

