

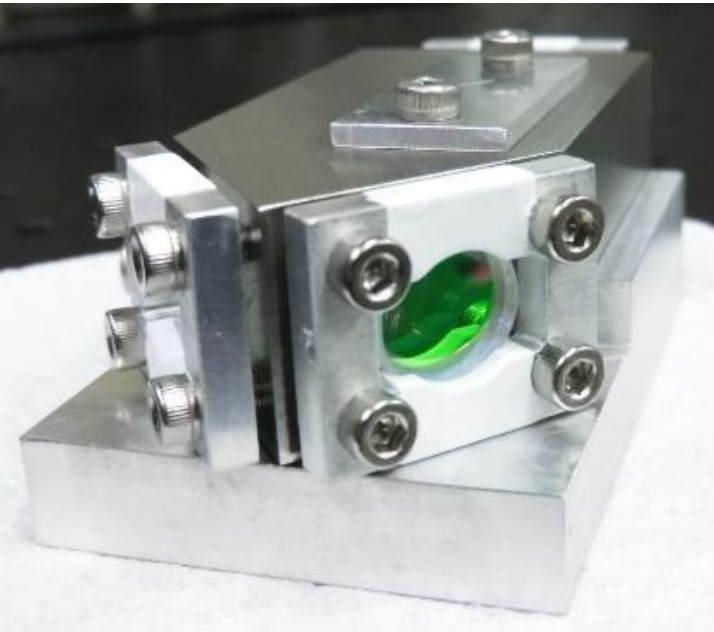
重力波を用いた 新しい宇宙観測

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

- 1987年 生まれ
- 2010年 東京大学 理学部 物理学科 卒業
- 2014年 東京大学 大学院理学系 物理学専攻 助教
- 2015年 東京大学 博士(理学)取得
重力波望遠鏡KAGRAの開発
レーザー干渉計を用いた基礎物理実験





2017年 ノーベル物理学賞

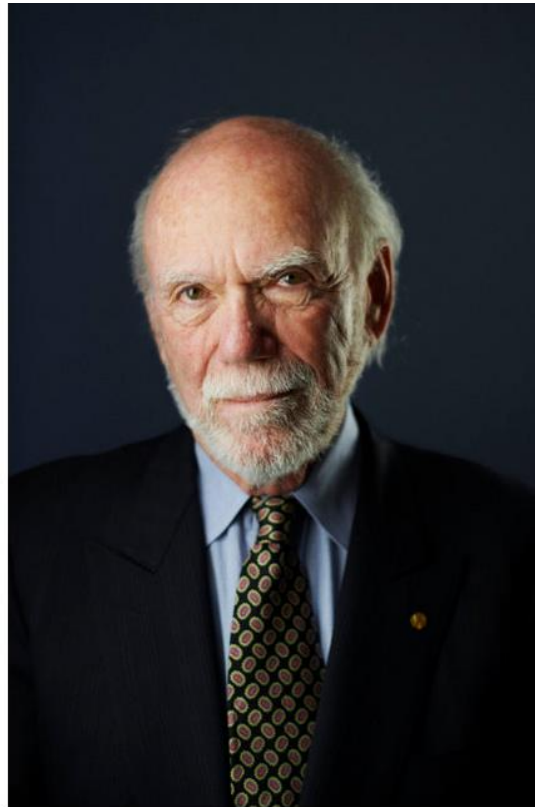
- LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献



© 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

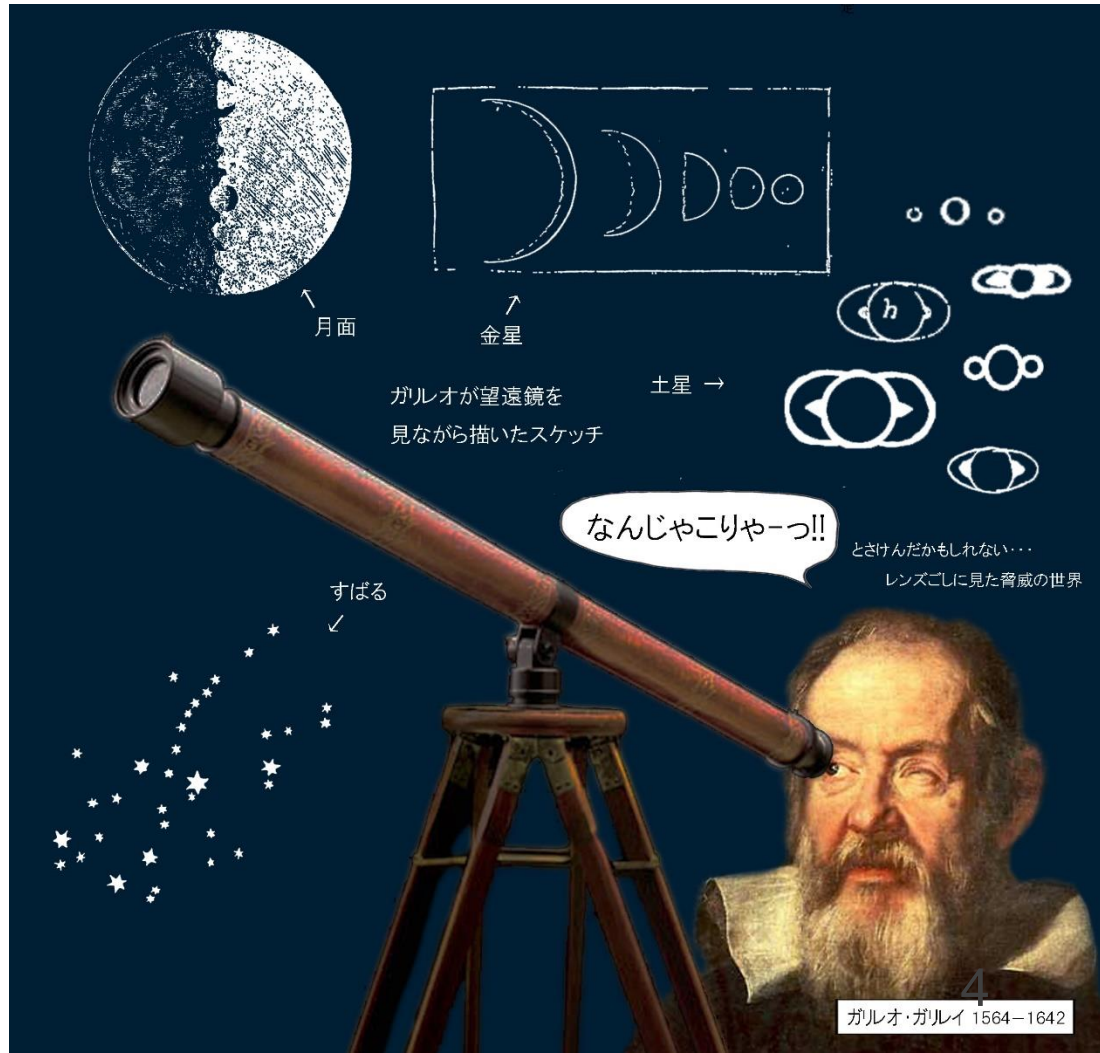
Kip S. Thorne

Prize share: 1/4

例えるなら

- 1609年 ガリレオが望遠鏡を作る
→ 光による天文学のはじまり

- 重力波の検出は
天文学の
ルネサンス



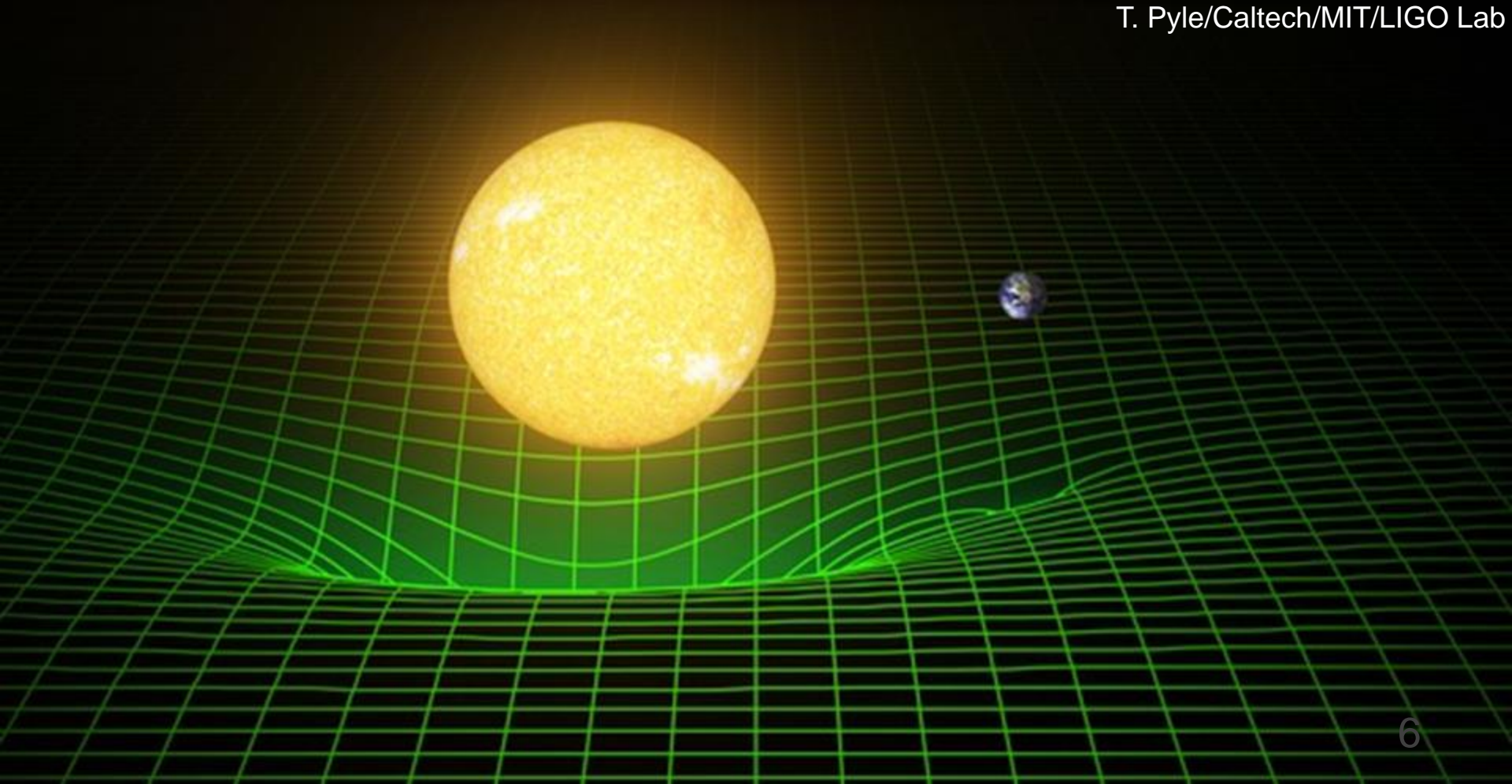
今日のお話

- **重力波**とは？
 - 一般相対性理論における重力
 - 重力波を出す天体現象
 - 重力波検出の原理
 - 重力波の初検出でわかったこと
 - わからなかったこと
- 重力波天文学・物理学のこれから
 - 日本の**KAGRA**(かぐら)の紹介
 - 雑音低減技術
 - 宇宙**重力波望遠鏡
- **基礎研究**・**研究者**について

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

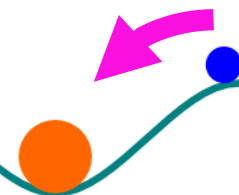
- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

なにもないトランポリンは平ら

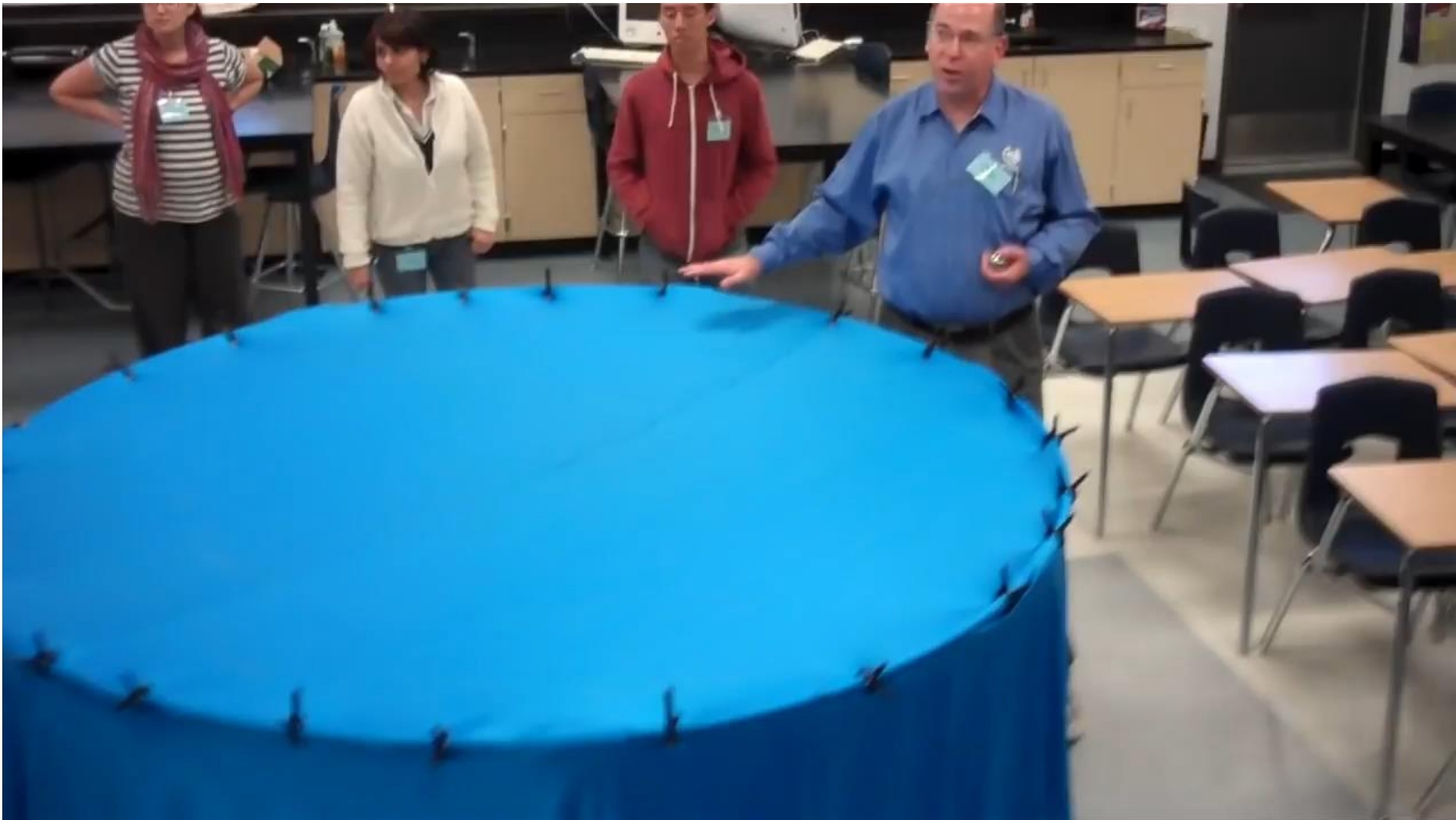


ボールを置くと
トランポリンが歪む

近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる

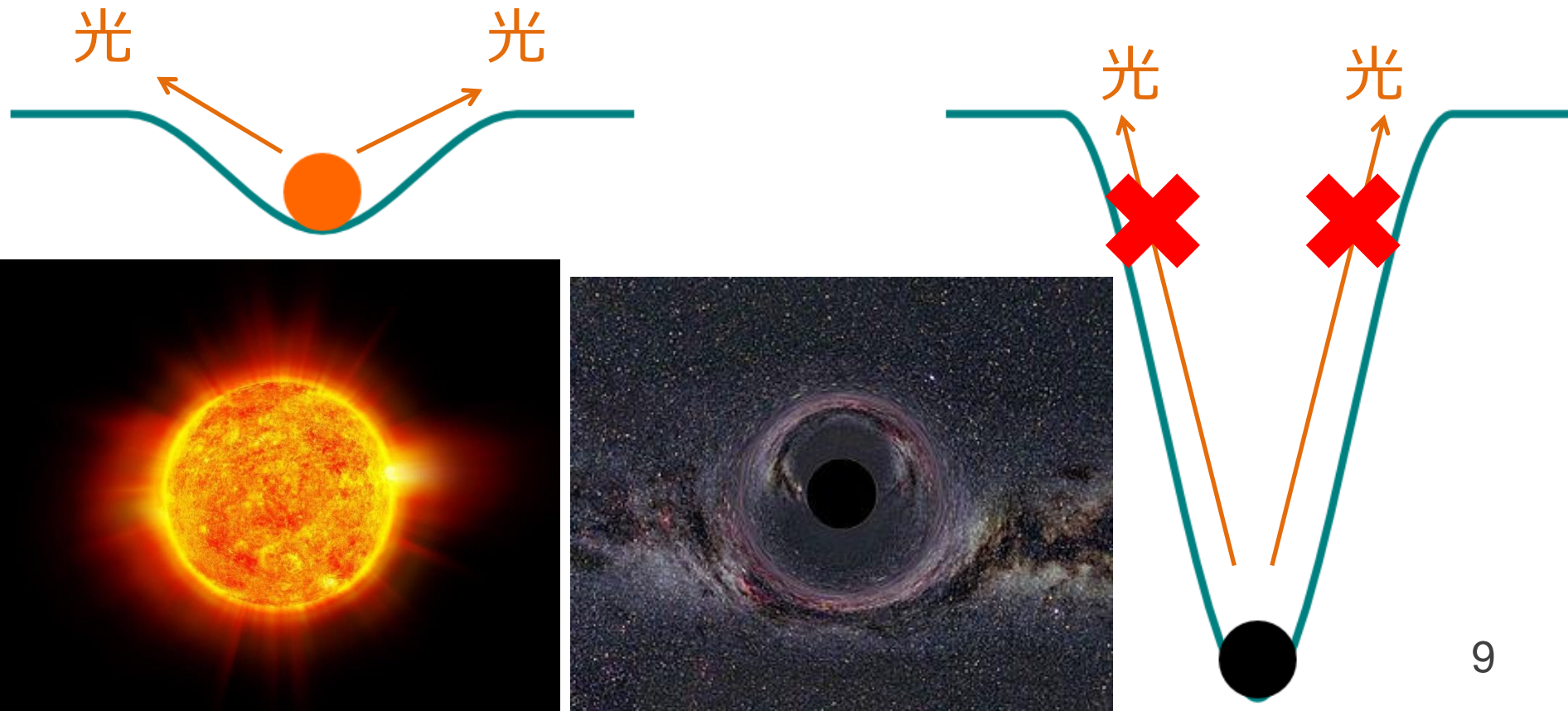


一般相対性理論における重力



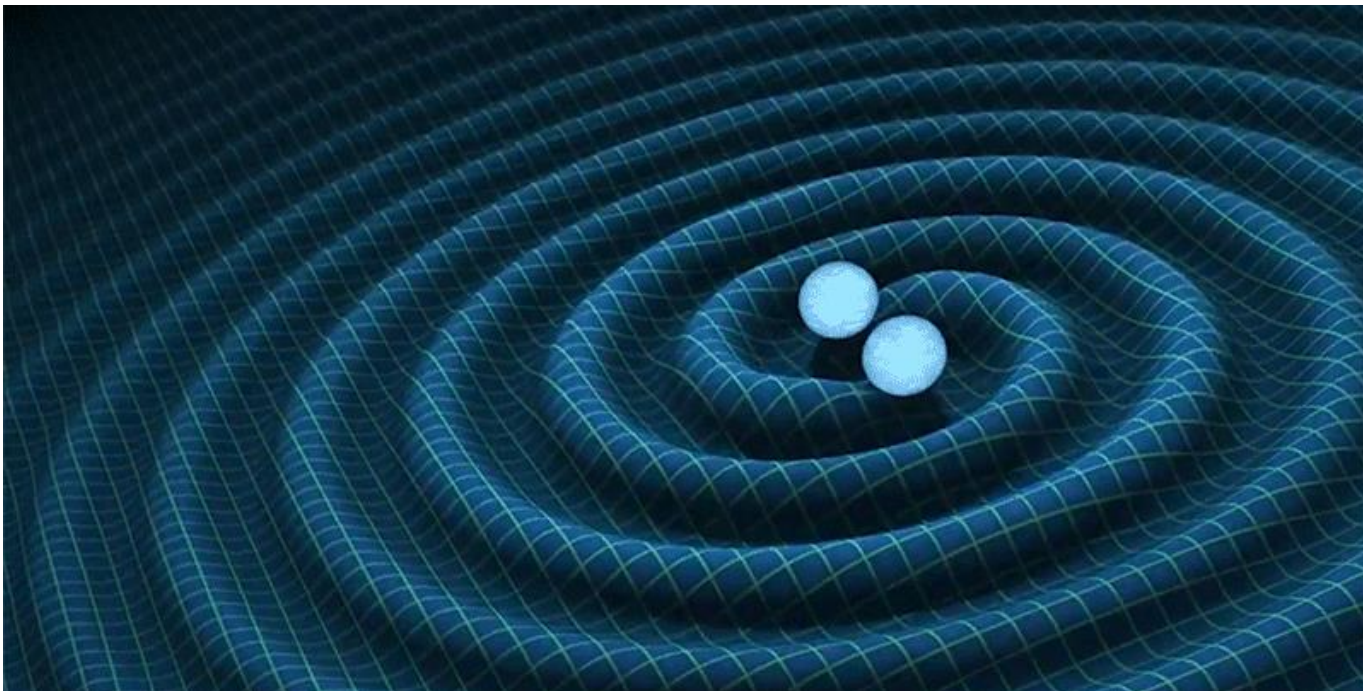
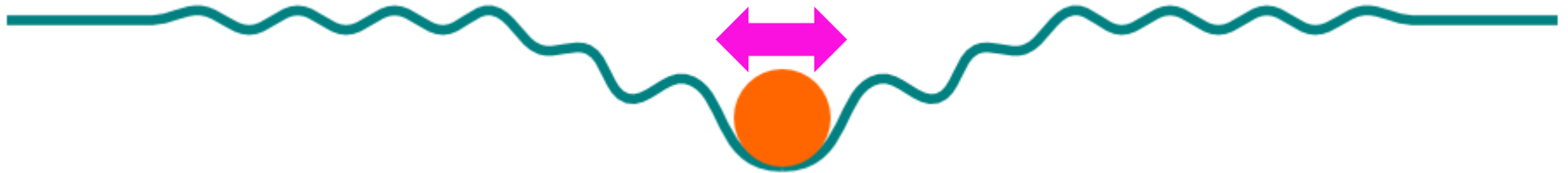
ブラックホール

- 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



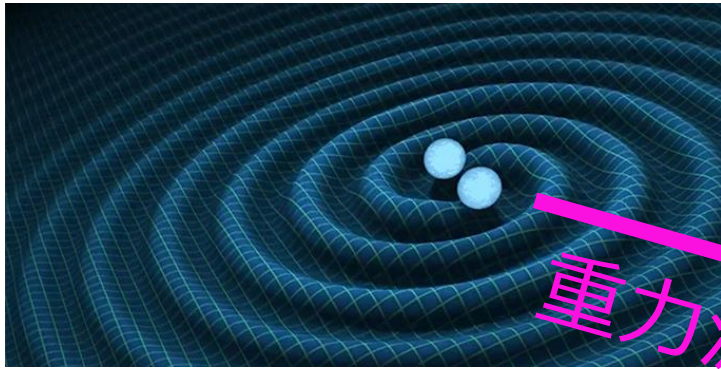
重力波は「時空のさざ波」

- 物体が動くと空間の歪みが変わり、光の速さで伝搬する → これが重力波

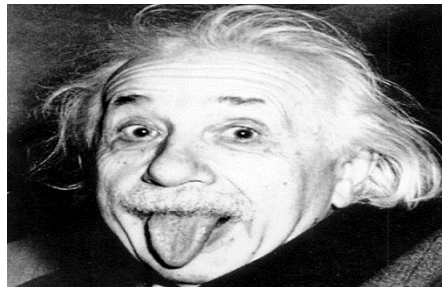
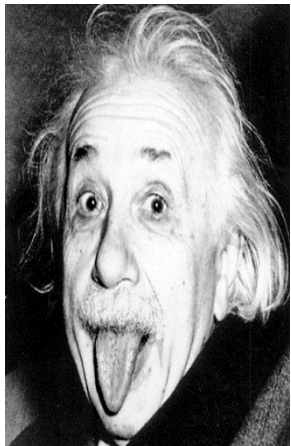
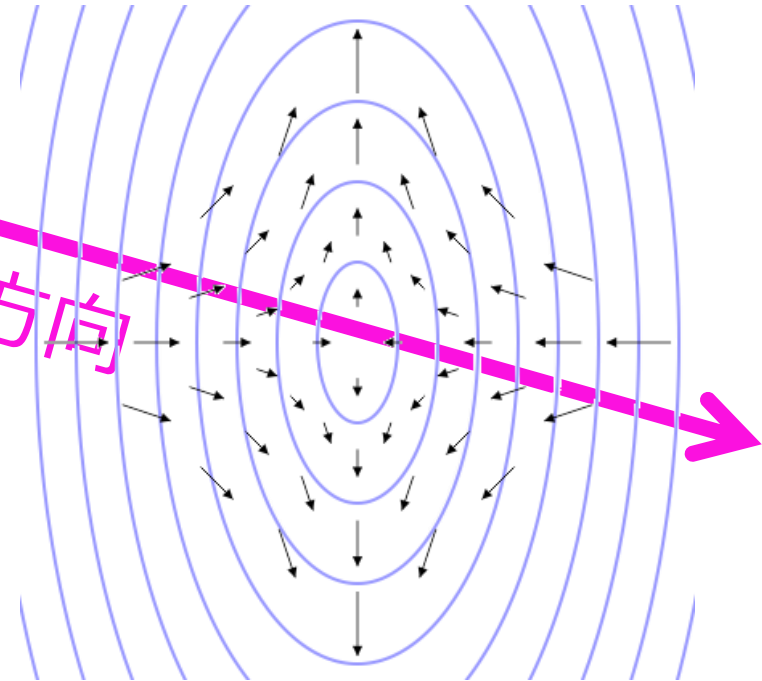


重力波の特徴

- 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)

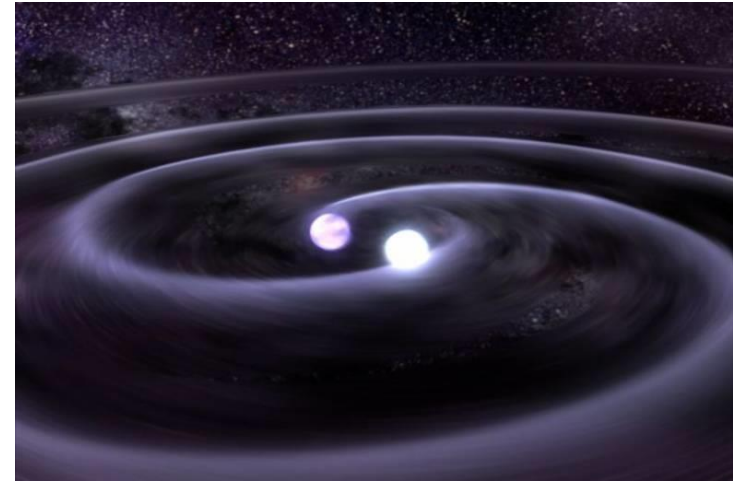


重力波の伝わる方向



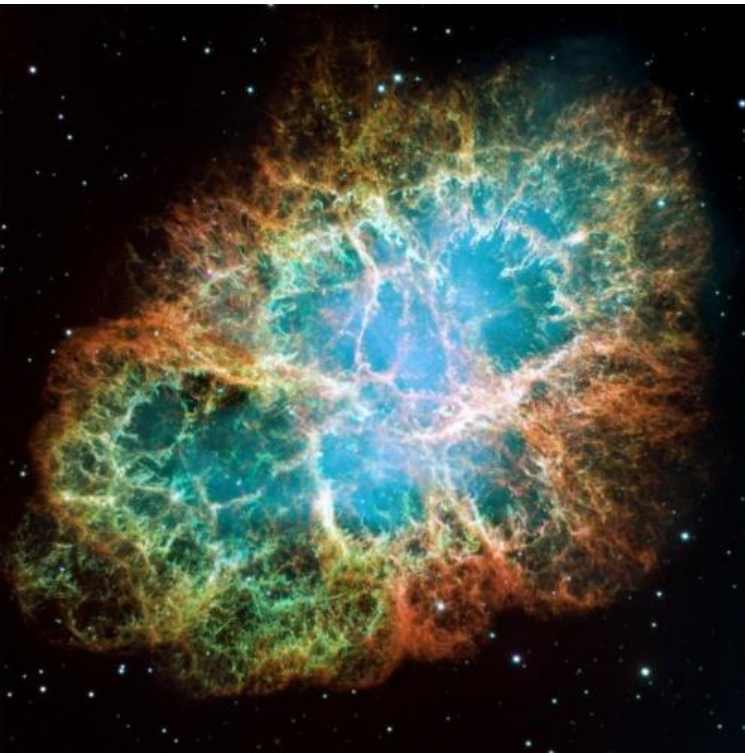
重力波源となり得る天体現象

- とても重く、
とても速く動く天体

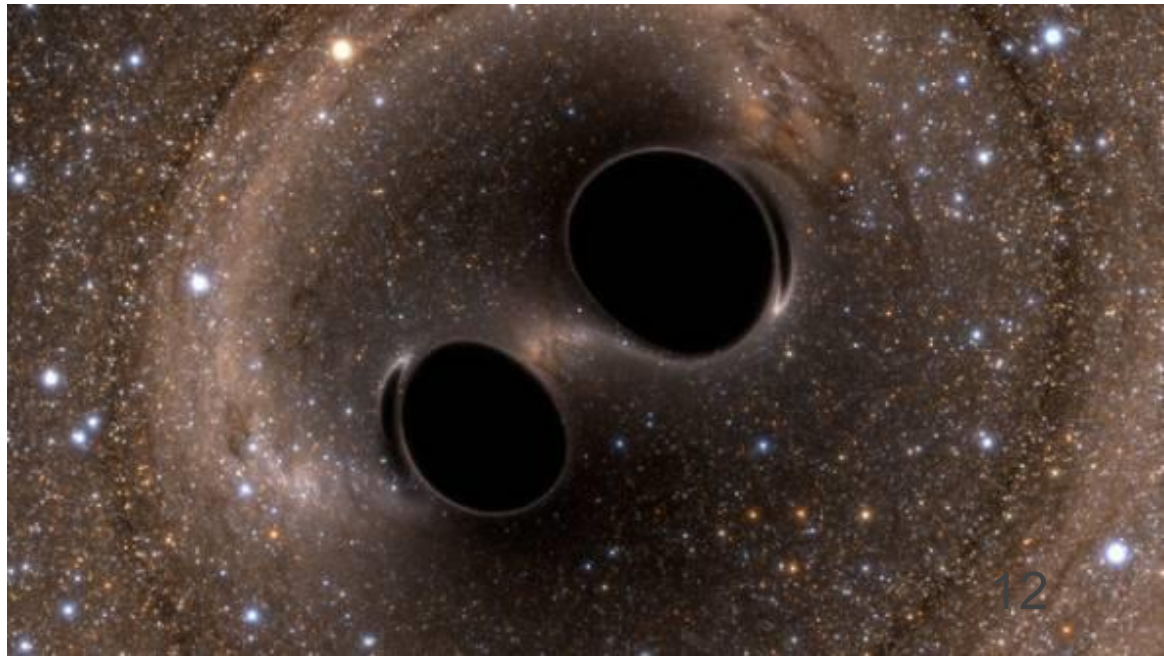


連星中性子星

超新星爆発



連星ブラックホール



電磁波で見て、重力波で聞く

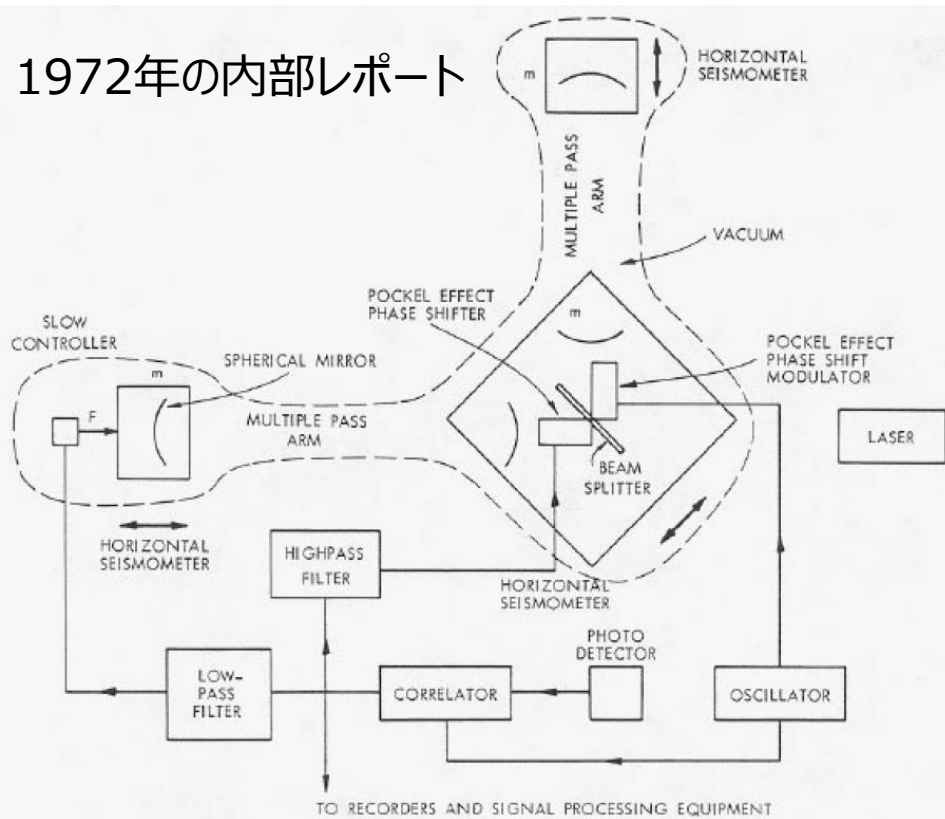
- **星の内部**を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

エコー写真(音波)でお腹
の中が見えるように



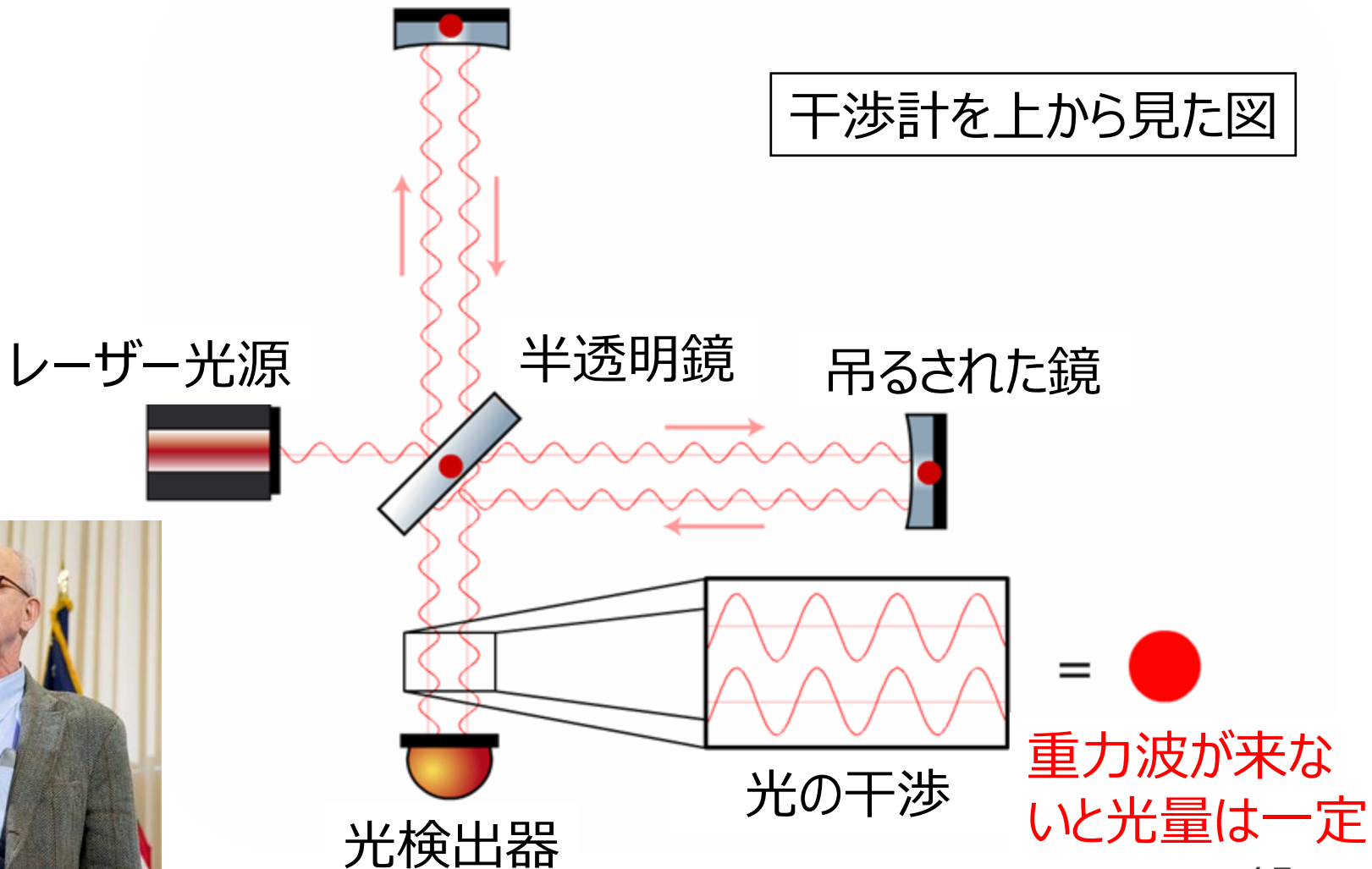
重力波の直接検出の方法

- 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



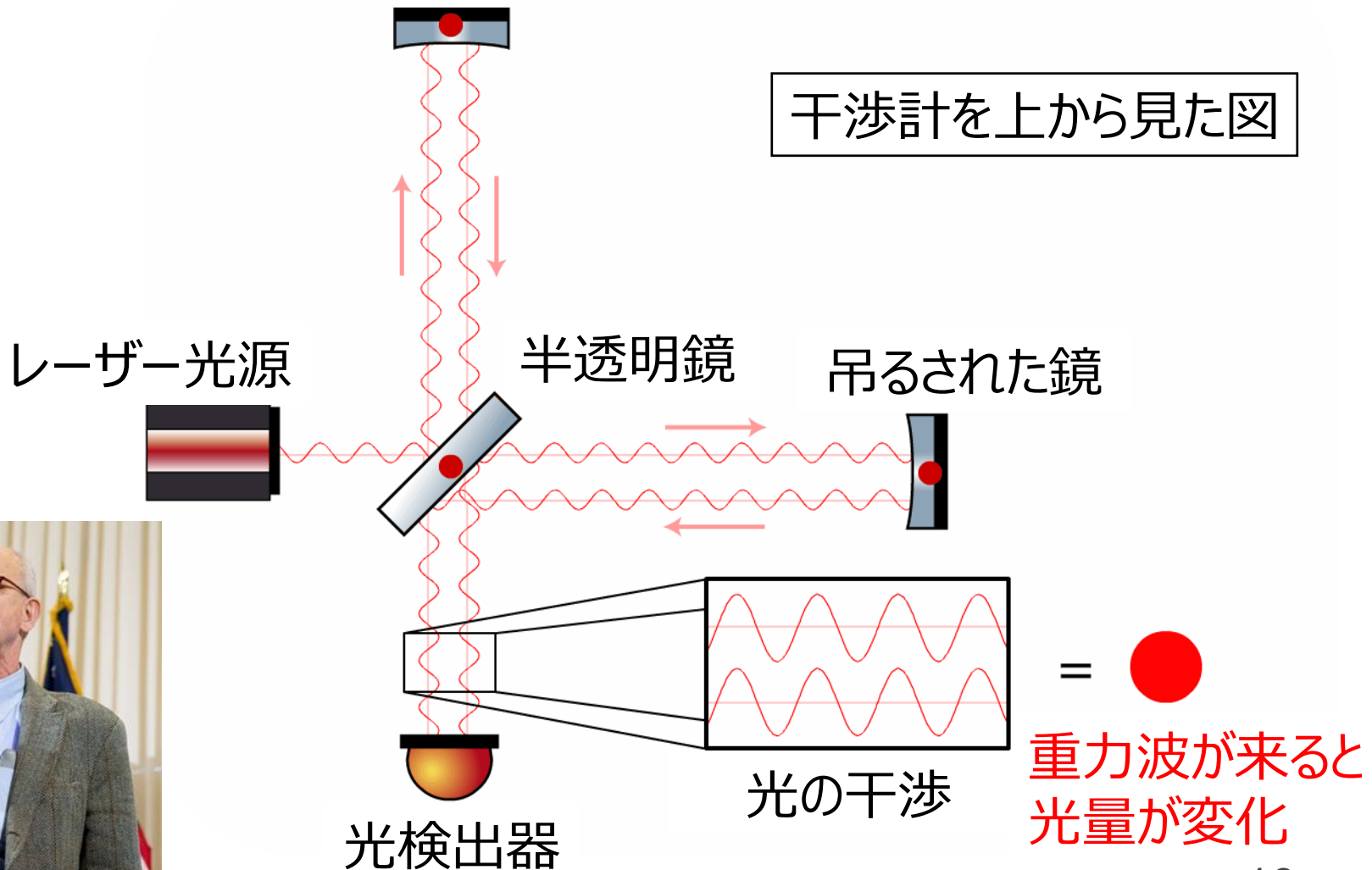
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



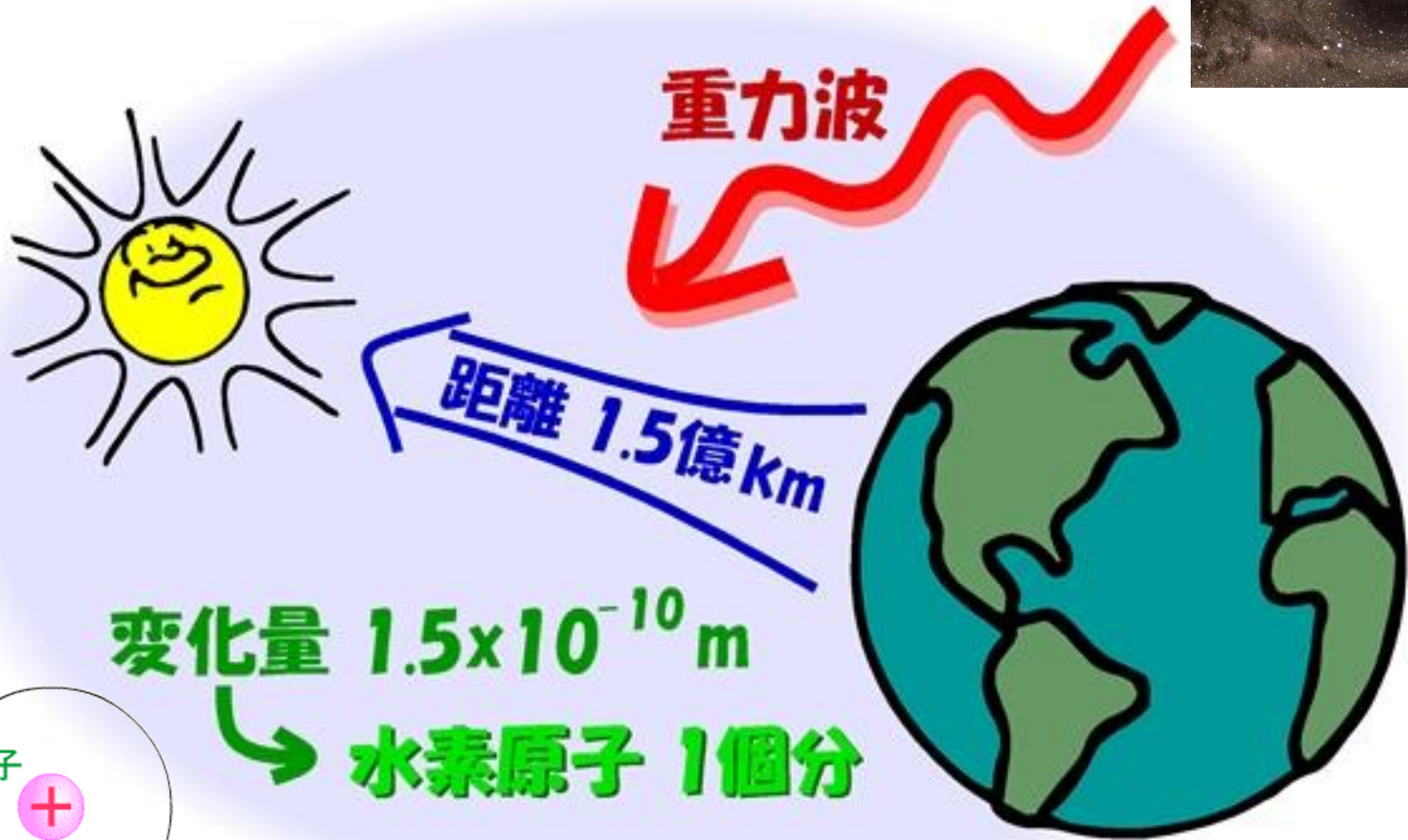
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



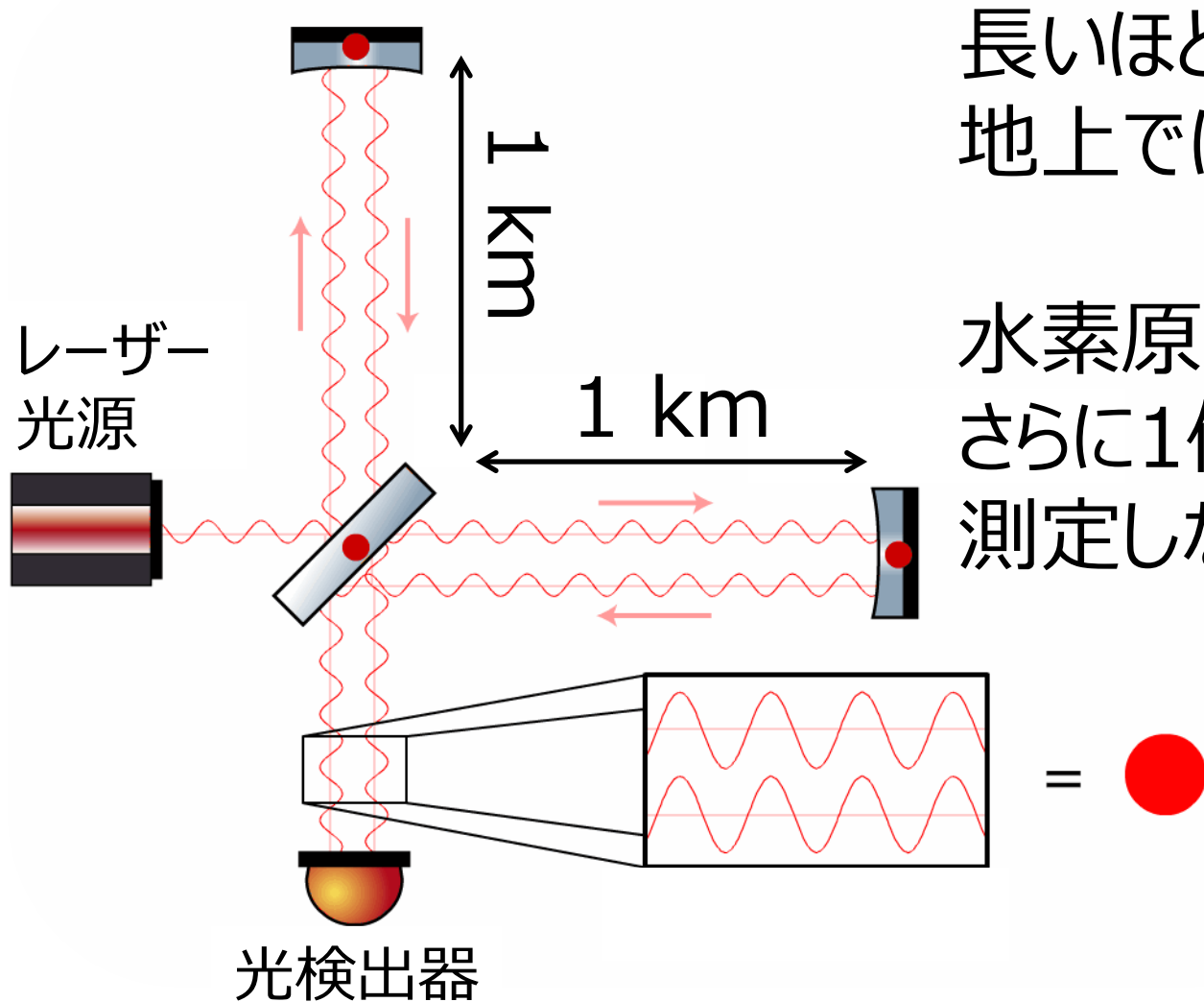
重力波の振幅はどれくらい？

- 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)



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の変化を
測定しないといけない

重力波直接検出までの歴史

- 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**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表
ブラックホール連星

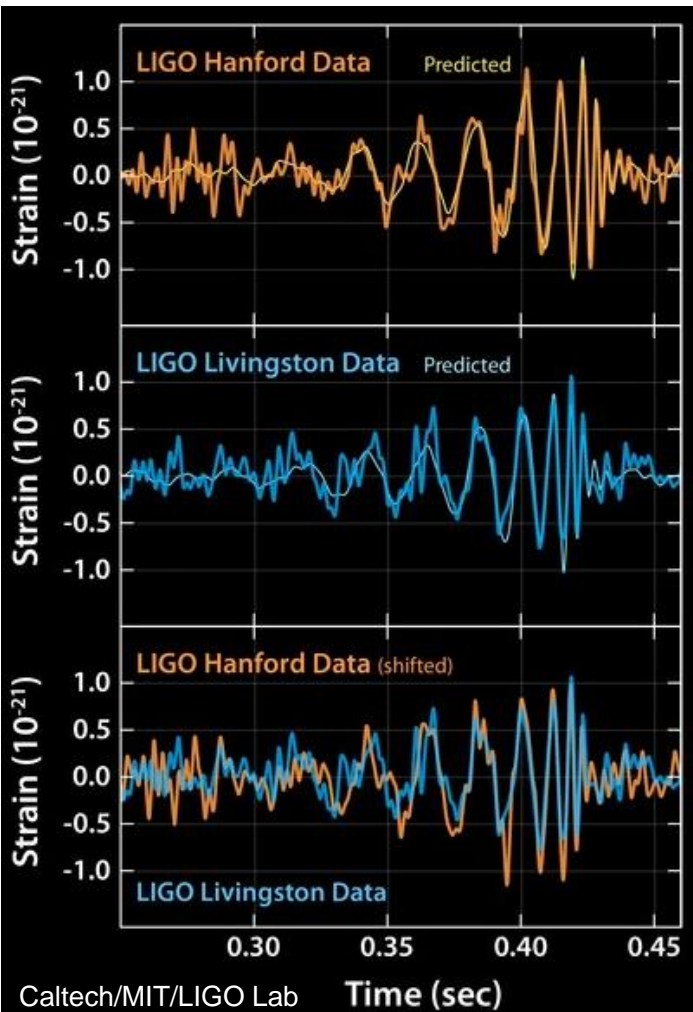
初検出を発表するライツィー

予言から100年
提案から50年！

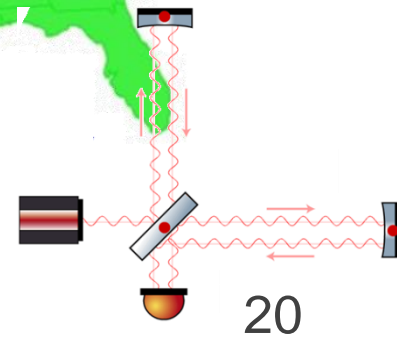


アメリカのLIGOによる初検出

- 3000 km離れた2台の望遠鏡でほぼ同時に同じ波形を検出



ハンフォード
観測所



重力波形から何がわかるか？

- 音の高低から**質量**、音の大きさから**距離**がわかる

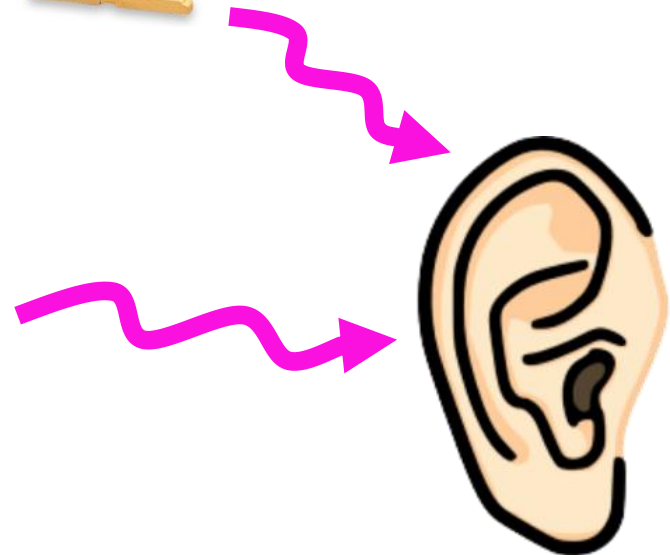
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

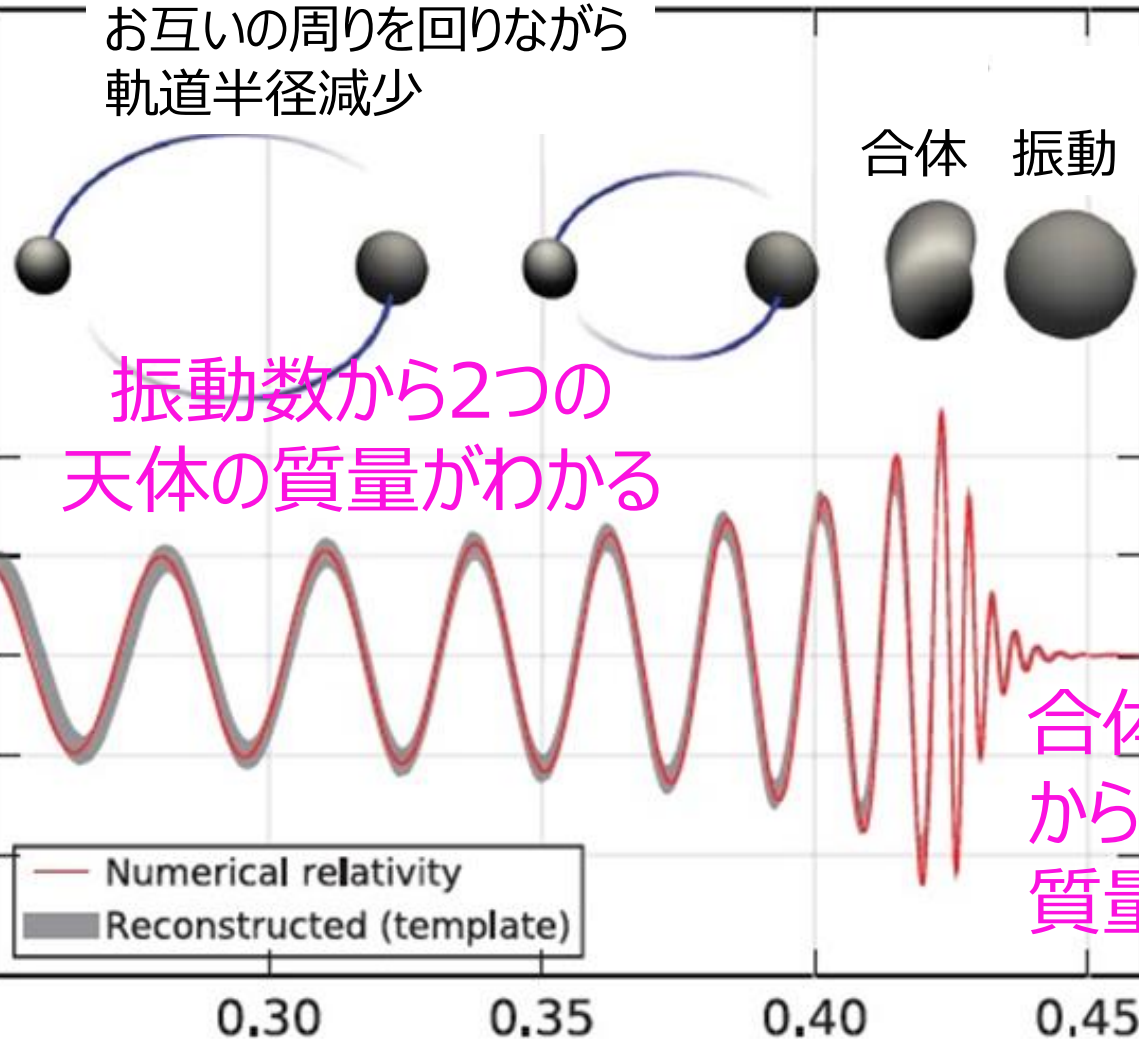


重力波形から何がわかるか？

- 天体の**質量**と**距離**がわかる

お互いの周りを回りながら
軌道半径減少

合体 振動



振幅から距離
がわかる

振動数から2つの
天体の質量がわかる

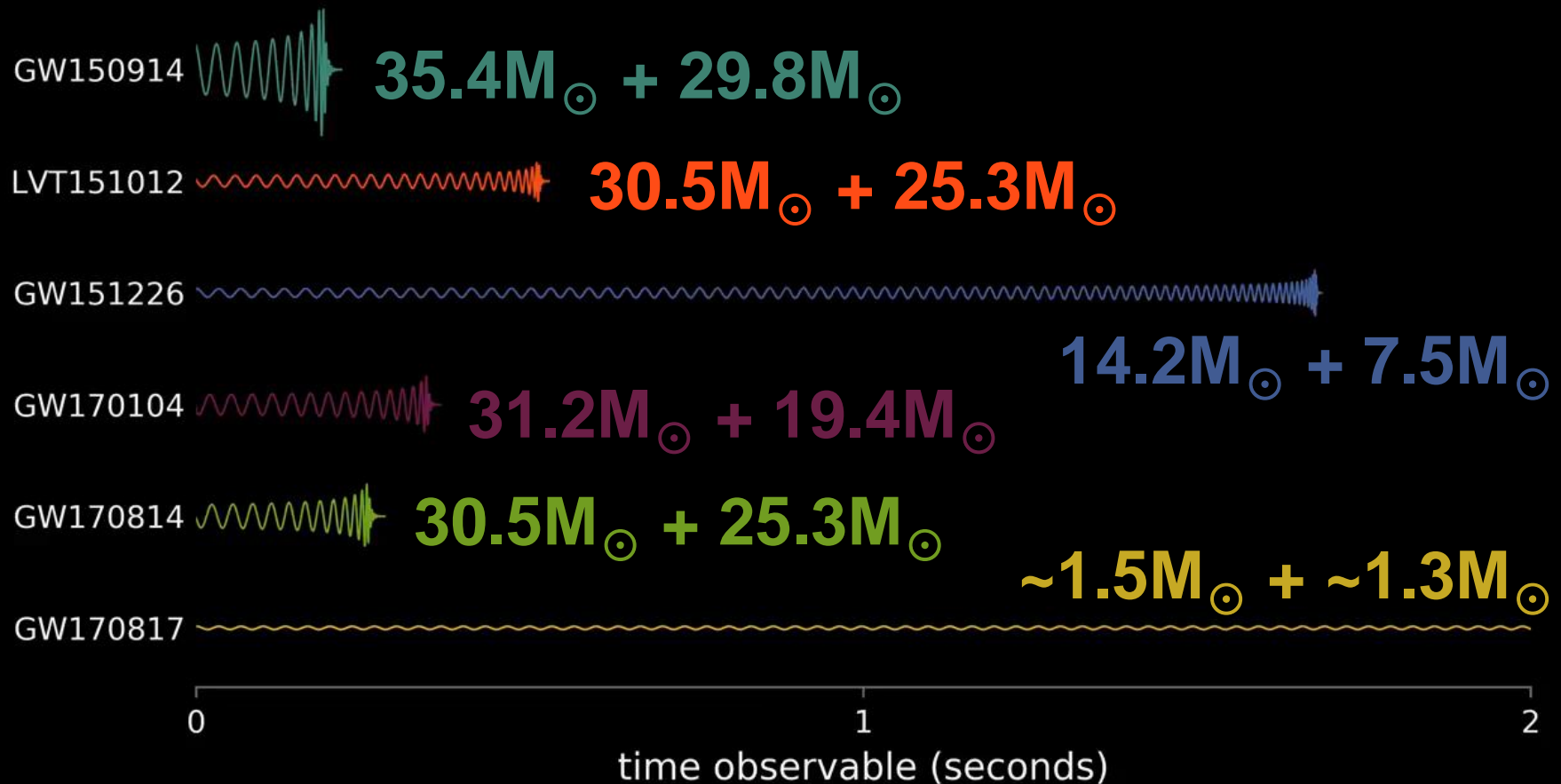
合体後の波形
から合体後の
質量がわかる

これまでに見つかった重力波

- 連星ブラックホールが5例、連星中性子星が1例

※GW170608もある($12M_{\odot} + 7M_{\odot}$)

https://youtu.be/RyXD_cSlAPc

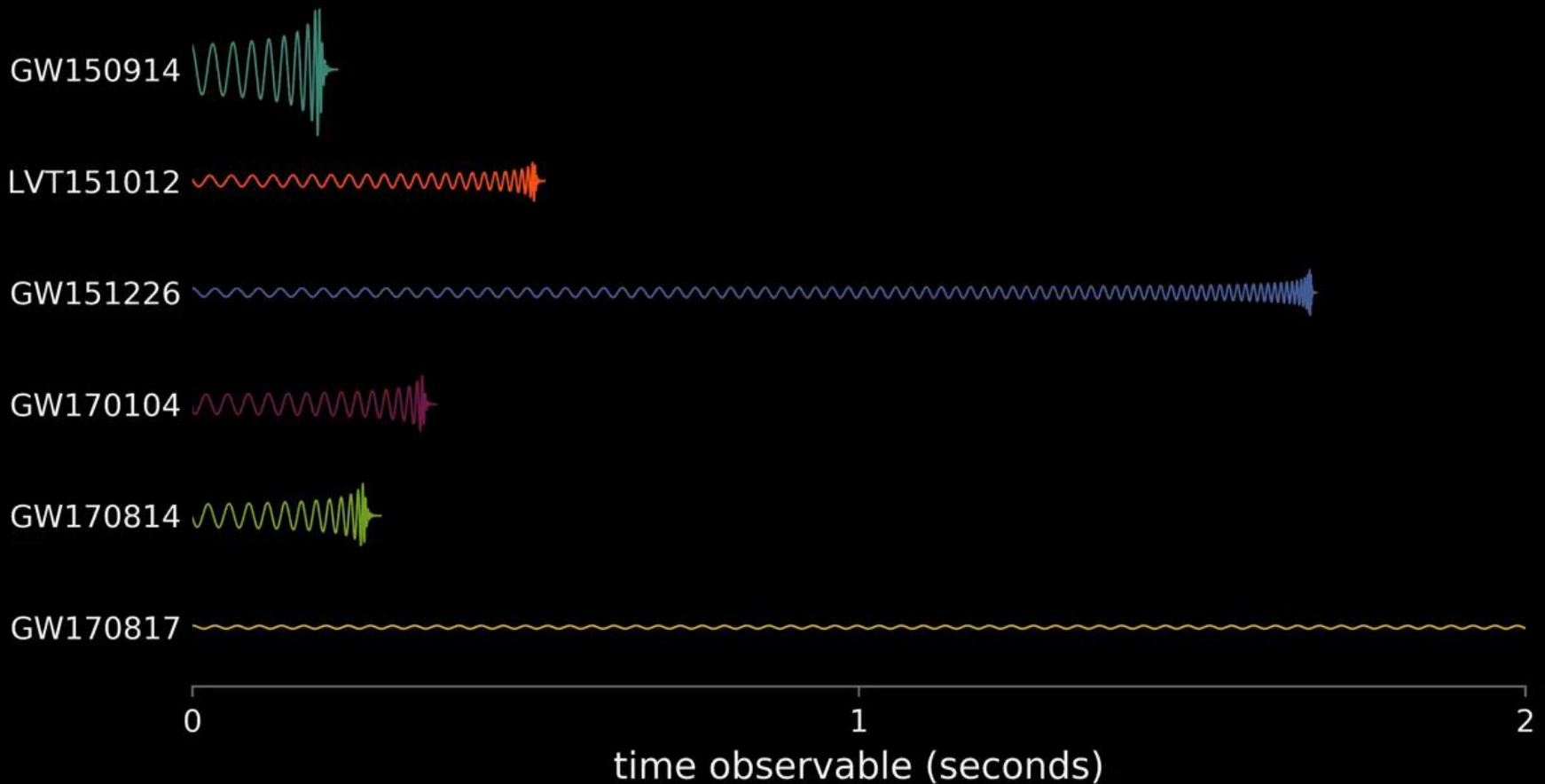


これまでに見つかった重力波

- 連星ブラックホールが5例、連星中性子星が1例

※GW170608もある($12M_{\odot} + 7M_{\odot}$)

https://youtu.be/RyXD_cSlAPc

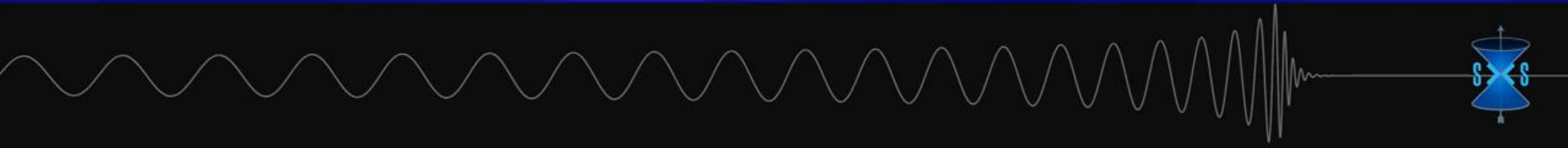
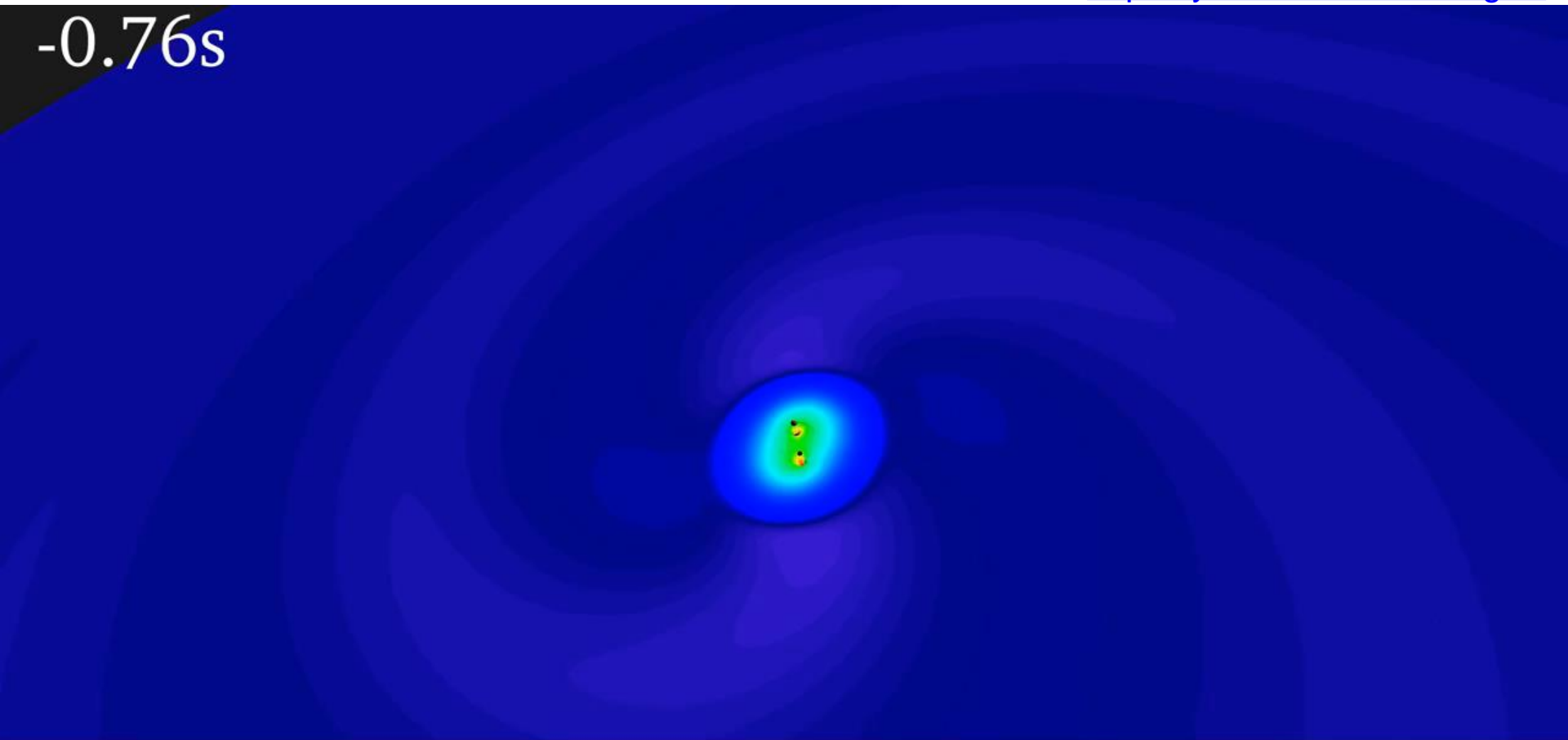


連星ブラックホール合体

- 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



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>

重力波の検出でわかったこと

- **連星ブラックホール**が存在する
しかもそれが宇宙年齢以内に合体する
- 太陽質量の約30倍を超えるブラックホールの存在
形成過程に新たな**謎**
- **重元素合成**に連星中性子星合体が関与している
元素の比率が全て説明できるのかはまだ不明
- 重力波が**光の速さ**で伝わることを確認
ガンマ線とほとんど同じタイミングで検出
- 一般相対論からのずれはまだ見つかっていない！

重力波天文学・物理学のこれから

- 連星合体をより詳しく調べて、ブラックホール形成の謎や元素合成の謎に迫る
 - 重力波望遠鏡の数を増やす
 - 重力波望遠鏡の感度を上げる

- 宇宙の歴史をさぐる
 - インフレーション起源の重力波
 - 宇宙に重力波望遠鏡を打ち上げる

重力波天文学・物理学のこれから

- 連星合体をより詳しく調べて、ブラックホール形成の謎や元素合成の謎に迫る
 - 重力波望遠鏡の数を増やす
 - 重力波望遠鏡の感度を上げる
 - 日本のKAGRA
 - 欧米の高感度化計画
- 宇宙の歴史をさぐる
 - インフレーション起源の重力波
 - 宇宙に重力波望遠鏡を打ち上げる
 - 日本のDECIGO
 - 欧米のLISA

世界の重力波観測ネットワーク

- 各国で建設・改良が進行中



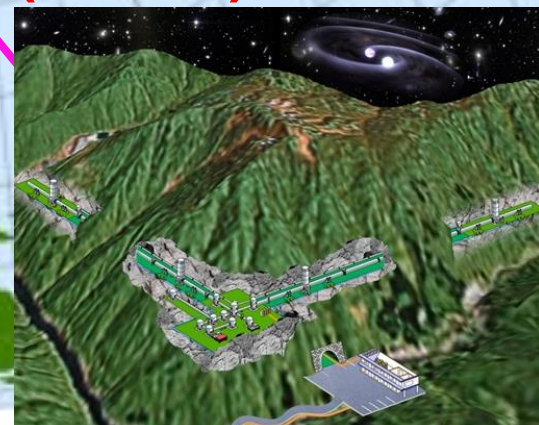
改良型LIGO
(初検出後、改良中)



改良型LIGO



KAGRA
(建設中)



LIGO-India (原則承認)



KAGRA建設中

- 大型**低温**重力波望遠鏡 (愛称: かぐら)
- 岐阜県の神岡鉱山**地下**に建設中
- **地下建設と低温が大きな特徴**
- 日本を中心に15ヶ国、
90以上の大学・研究機関、**370人以上**の共同研究者



プロジェクト代表:
梶田隆章



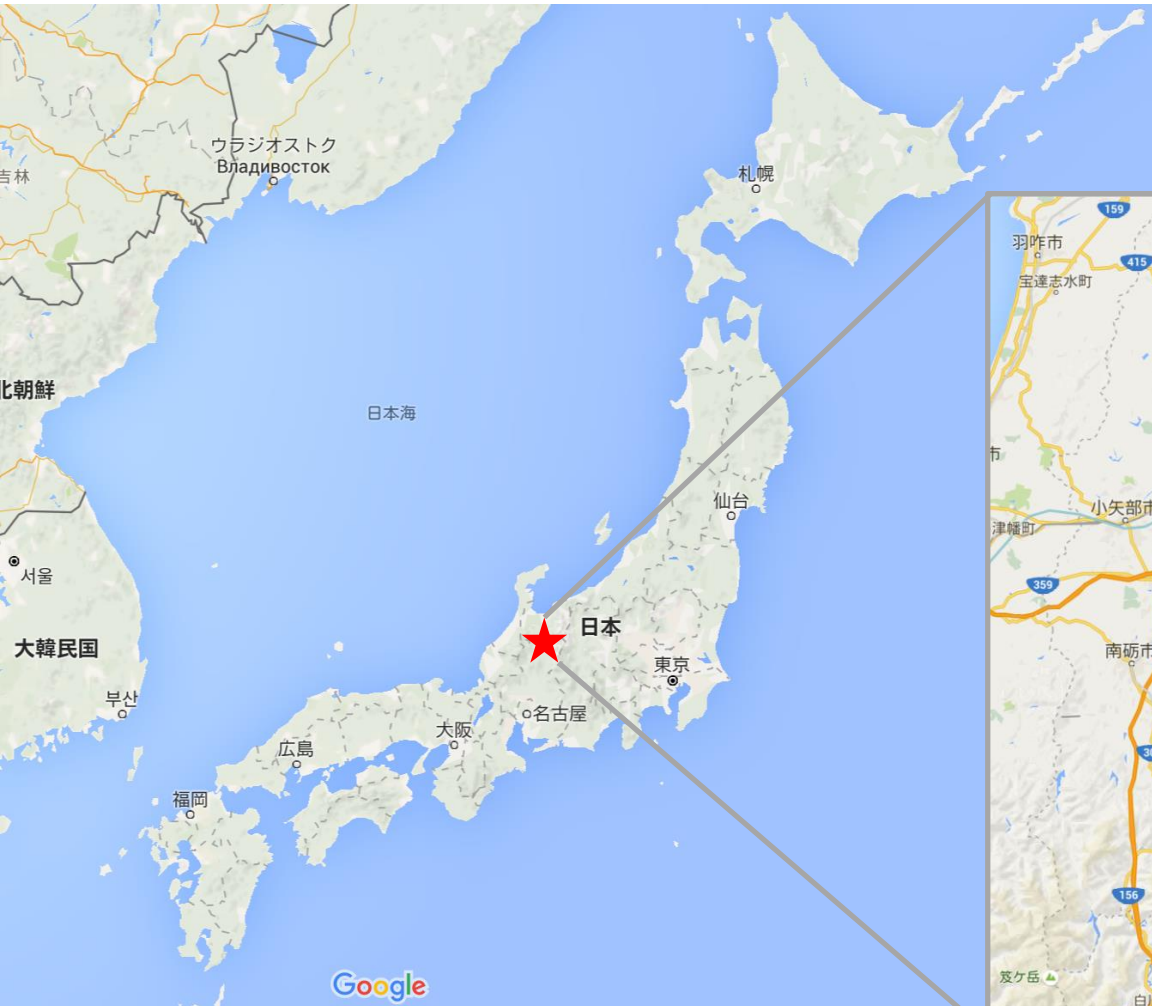
などなど

KAGRA建設中

- 大型低温重力波望遠鏡
- 岐阜県の神岡鉱山地下に建設中



東京から新幹線で2時間半



富山駅から
車で1時間

神岡の研究施設

- 池ノ山に片腕3 kmのL字型トンネル



KAGRAトンネル

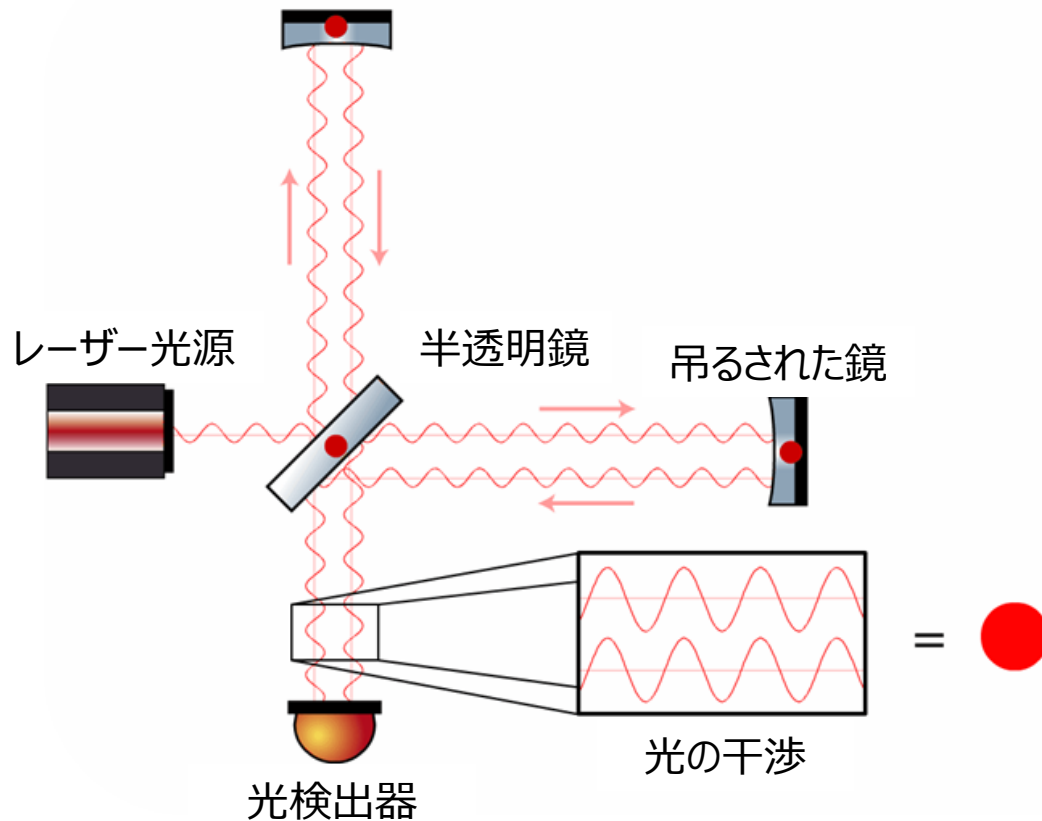
- トンネル内にレーザー光が通るための片腕3 kmの真空パイプ



新跡津坑口
(2016.2.8)

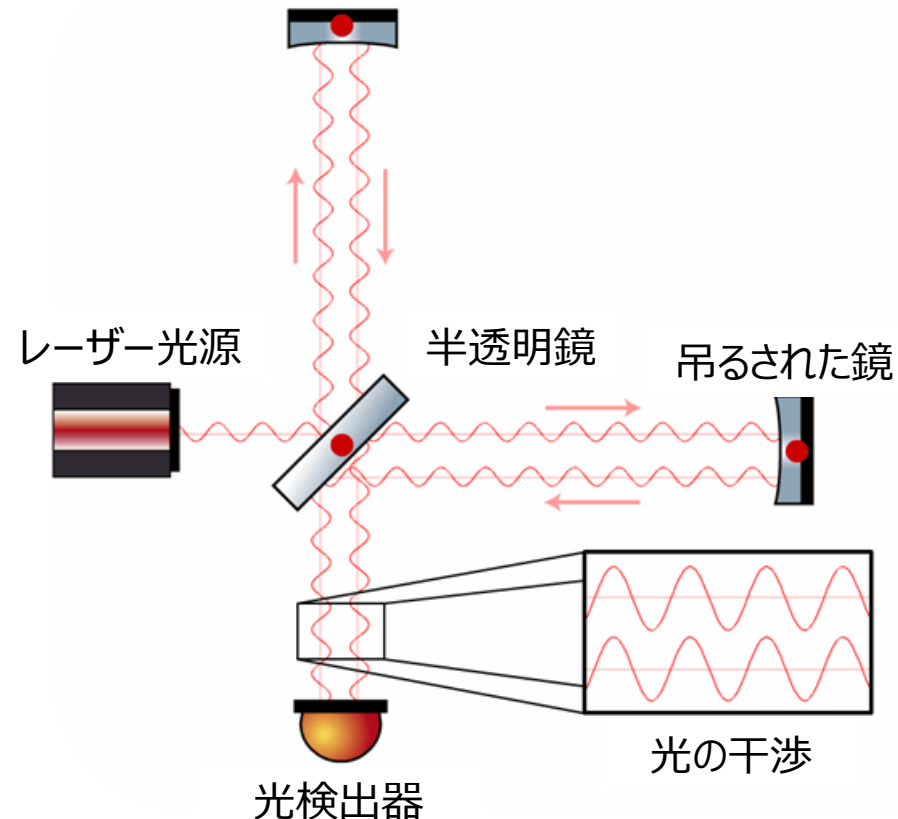
考えてみよう

- 重力波検出にとって、雑音になるものはなんでしょう？



あらゆる雑音源

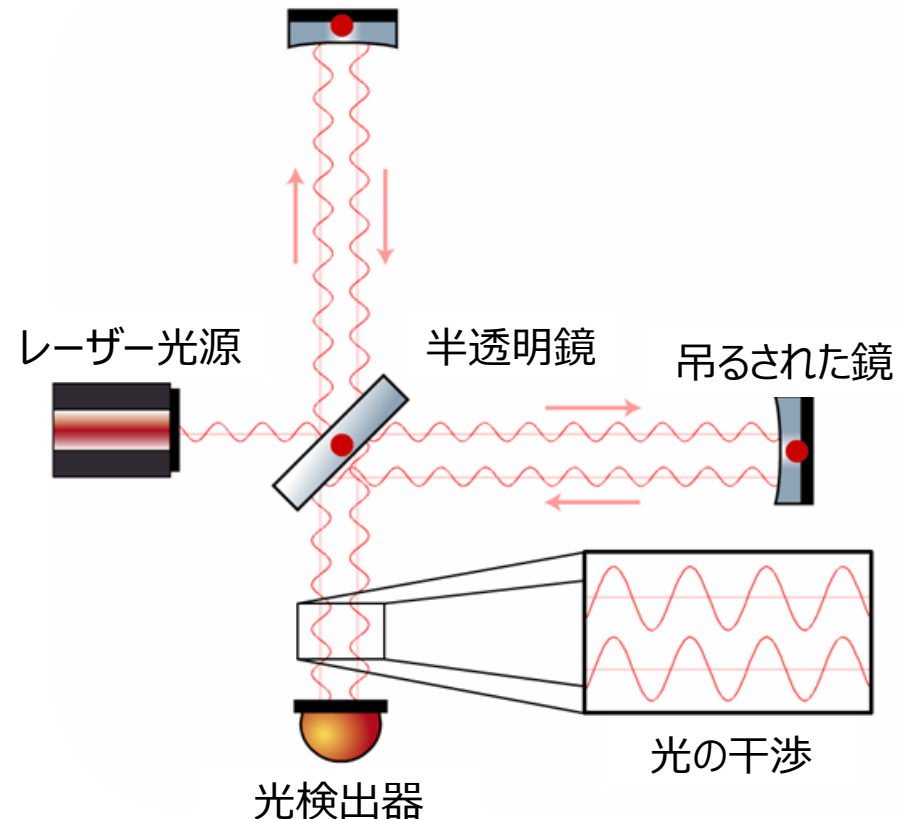
- 地面振動雑音
- 熱雑音 (鏡の熱振動)
- 量子雑音 (光の量子性)
- 残留ガス雑音
- 重力勾配雑音
- レーザー周波数雑音
- レーザー強度雑音
- 静電気力雑音
- 回路の電気系雑音
などなど.....



あらゆる雑音源

- 地面振動雑音 → 地下建設で低減
- 熱雑音 (鏡の熱振動) → 低温で低減
- 量子雑音 (光の量子性)

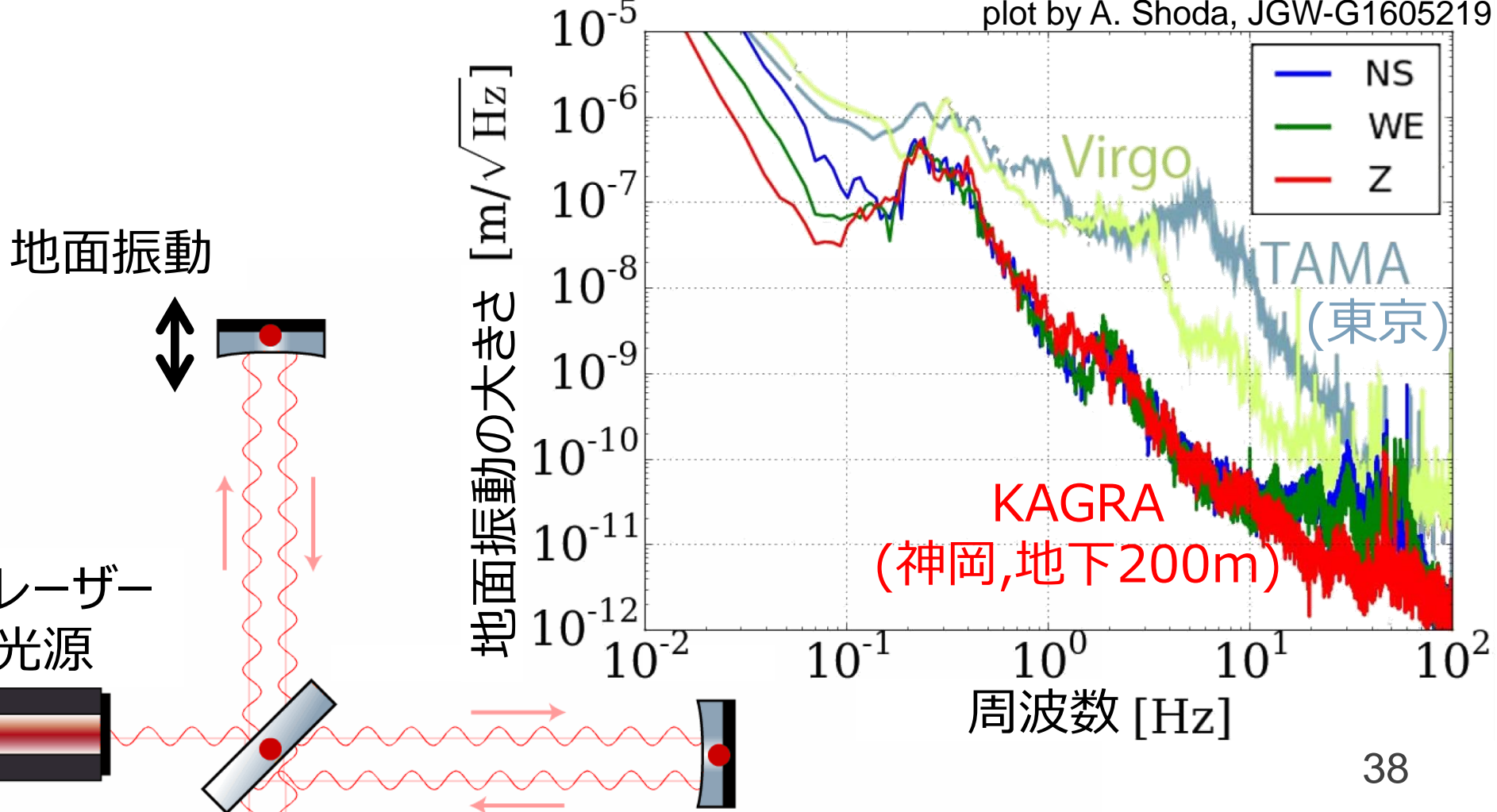
- 残留ガス雑音
- 重力勾配雑音
- レーザー周波数雑音
- レーザー強度雑音
- 静電気力雑音
- 回路の電気系雑音
などなど.....



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

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



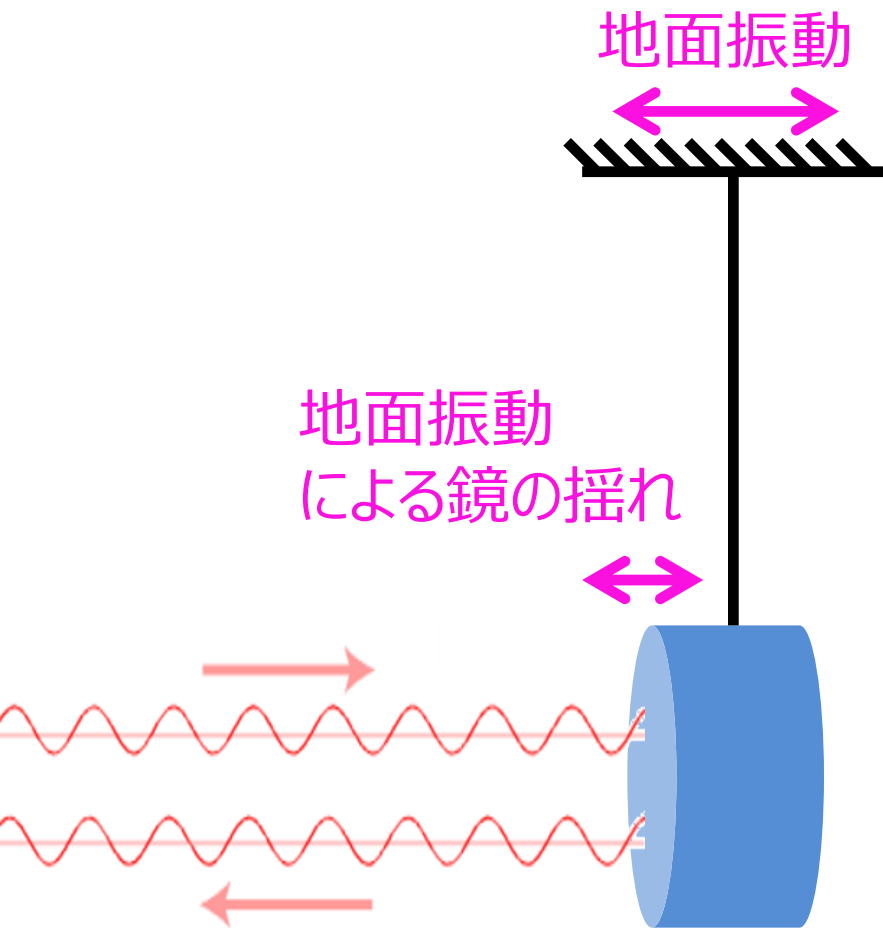
地下での作業

- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



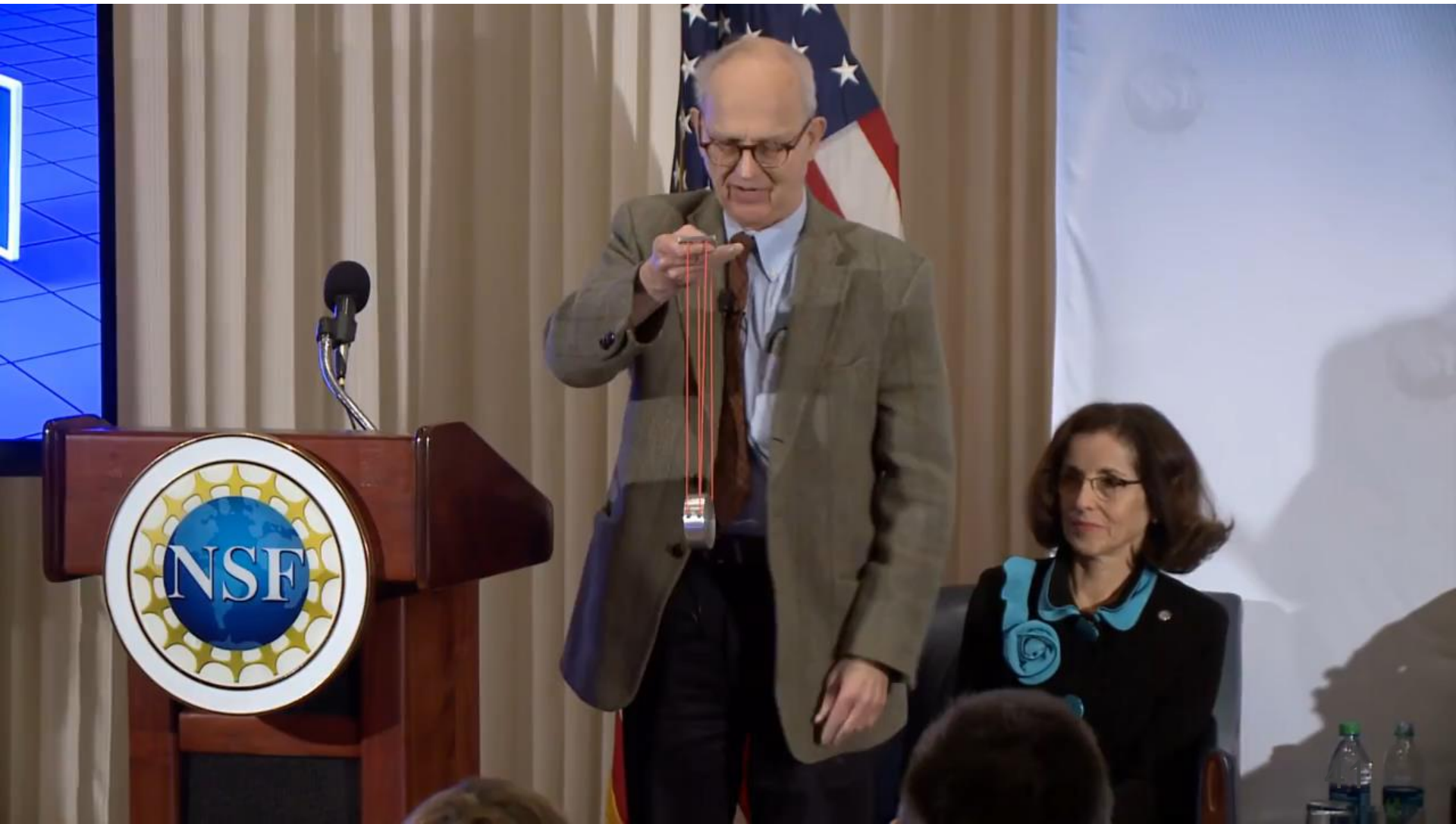
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



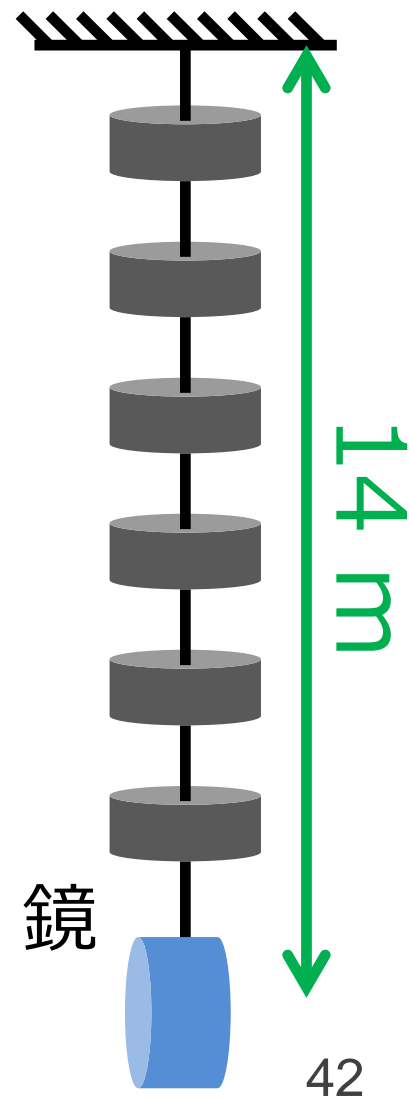
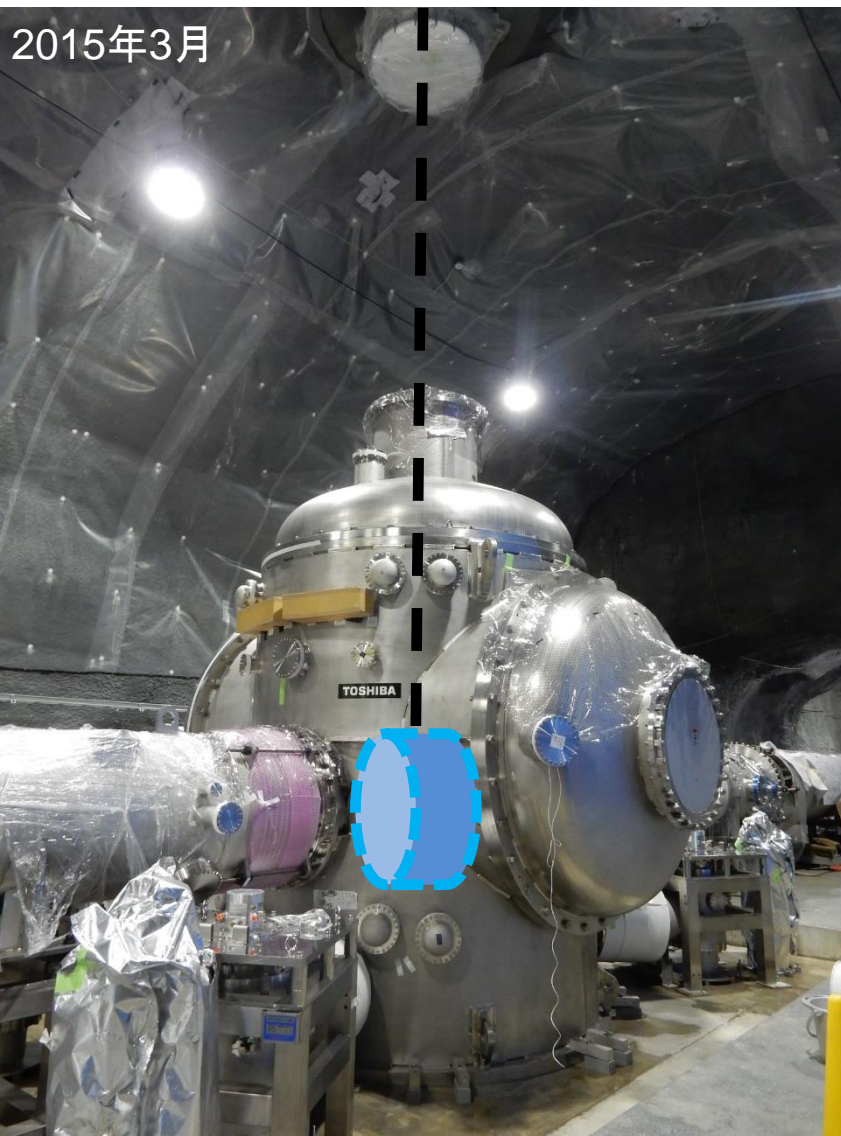
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



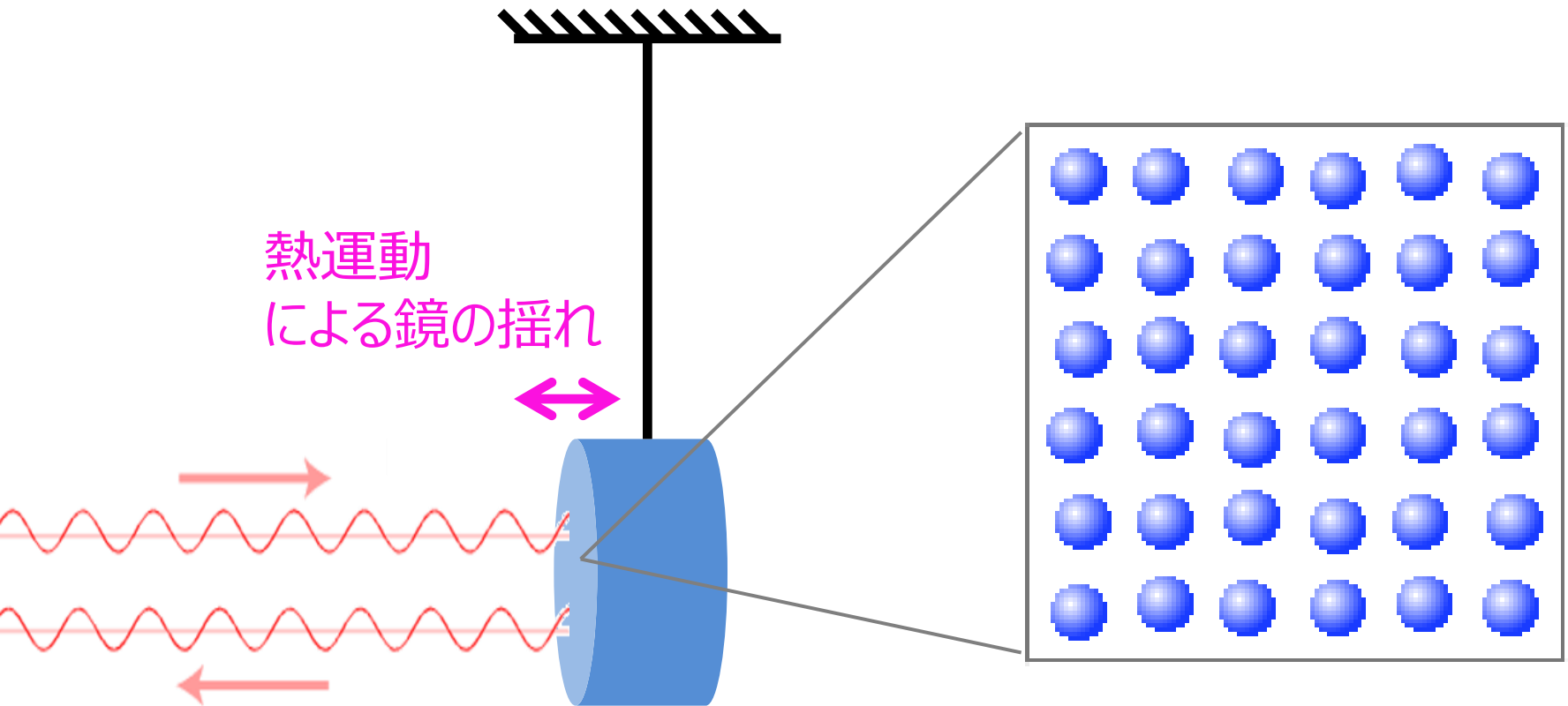
KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

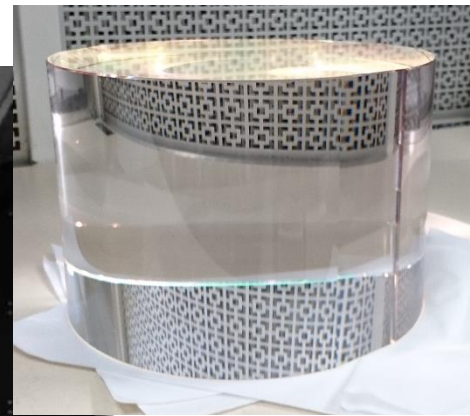
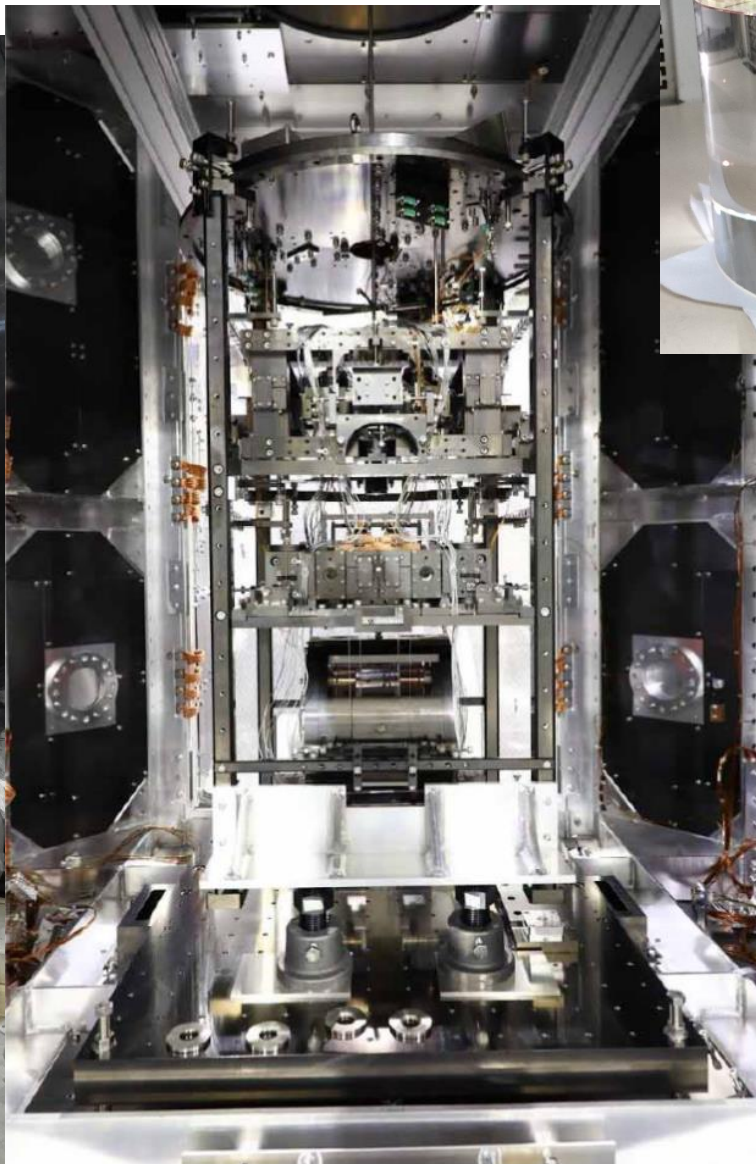
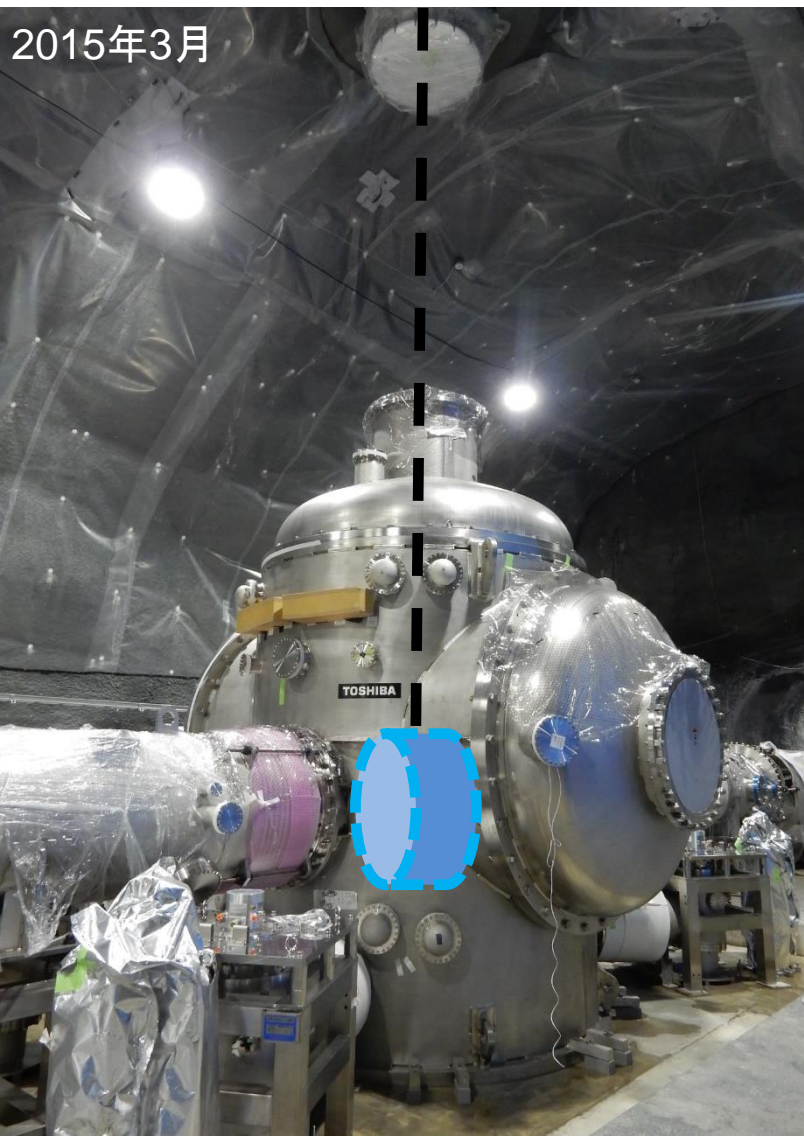


鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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



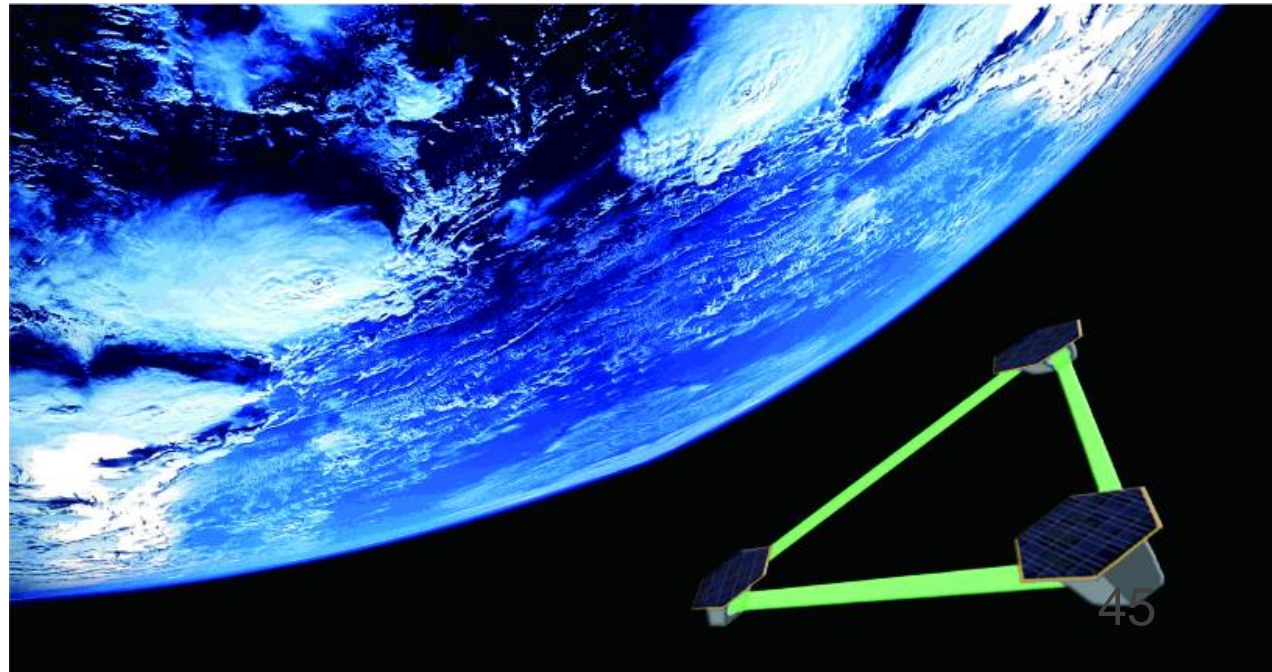
KAGRAの低温懸架装置



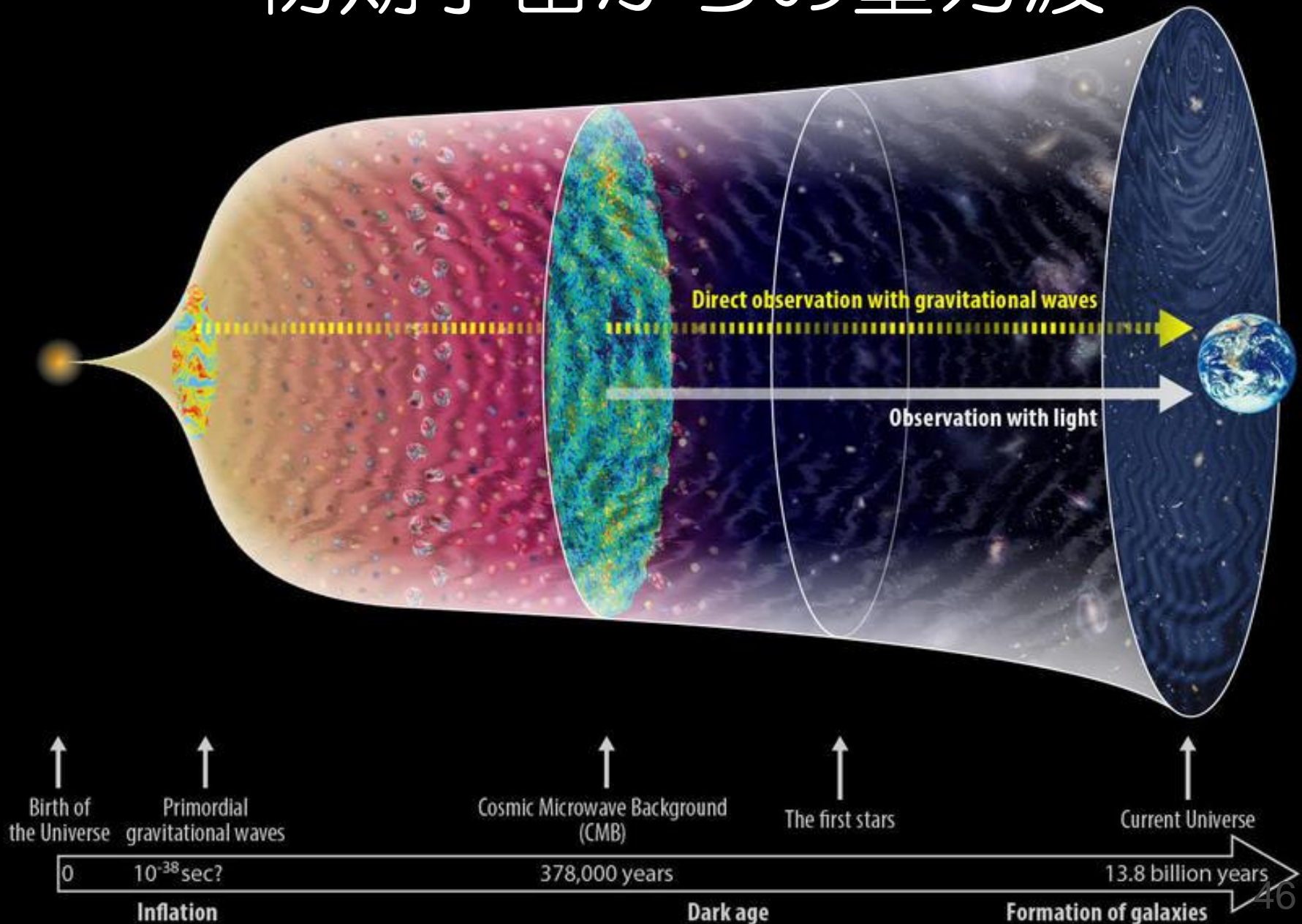
サファイア鏡
直径 22 cm
厚さ 15 cm

そして宇宙へ！

- 宇宙には地面振動がない、干渉計を長くできる
- 宇宙重力波望遠鏡**DECIGO**(でさいご)
宇宙空間で干渉計長を1000kmに
初期宇宙からの重力波
宇宙の誕生や**進化の歴史**に迫る



初期宇宙からの重力波



物理学の究極の夢

- 「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」
- 重力波の研究で答えることができる

ポール・ゴーギャン



まとめ

- 重力波を用いた天文学・物理学が幕をあけた
- 重力波の研究で
 - ブラックホールの謎
 - 物質の起源
 - 一般相対論にかわる重力理論
 - 宇宙の歴史などなどを探ることができる
- 日本では
 - 大型低温重力波望遠鏡
KAGRA
 - 宇宙重力波望遠鏡
DECIGO

重力波天文学の
夜明けが来たぜよ！



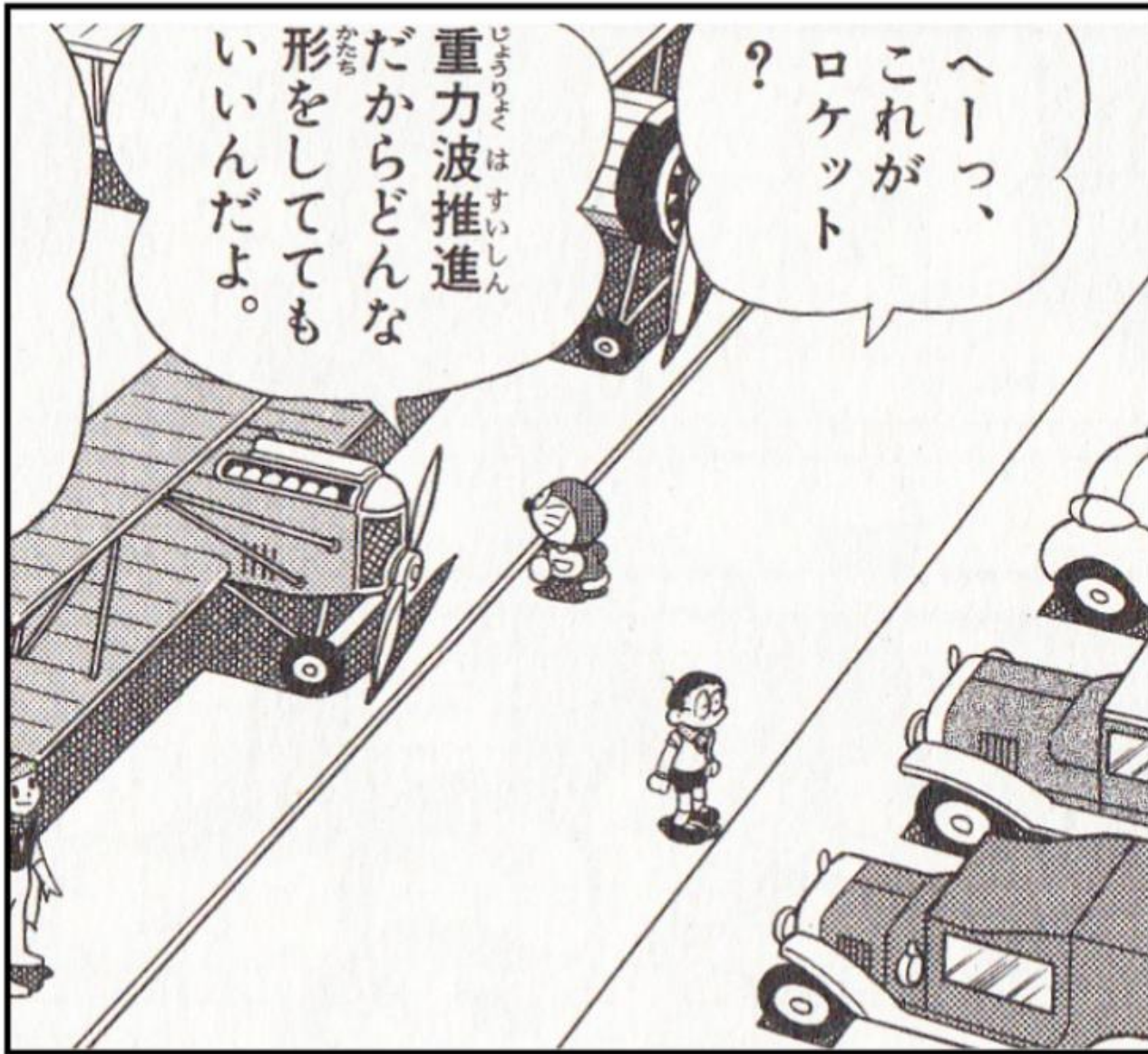
よくある質問



よくある質問



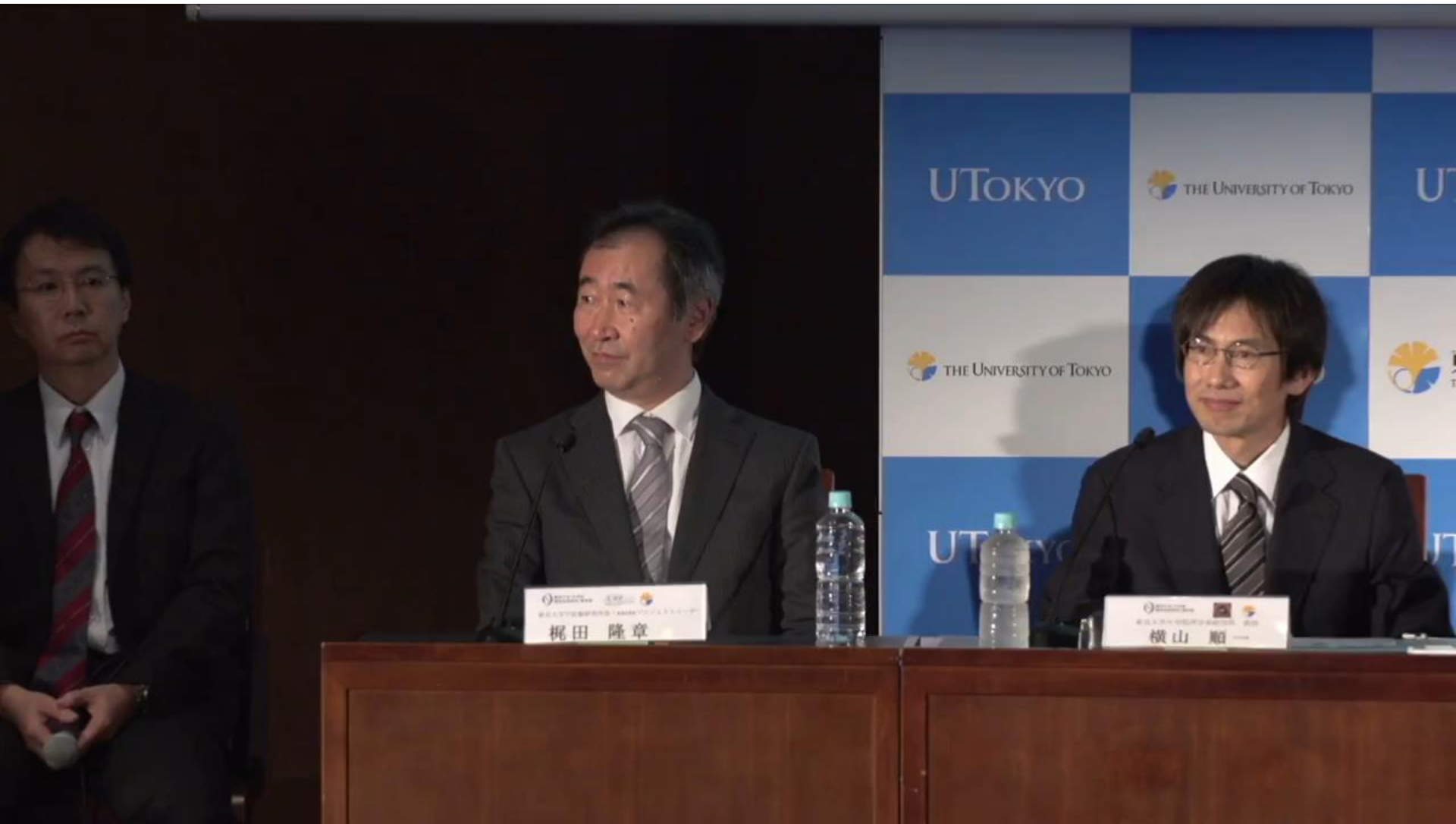
重力波って
何の役に
立つの？



© Tentomusi Comics

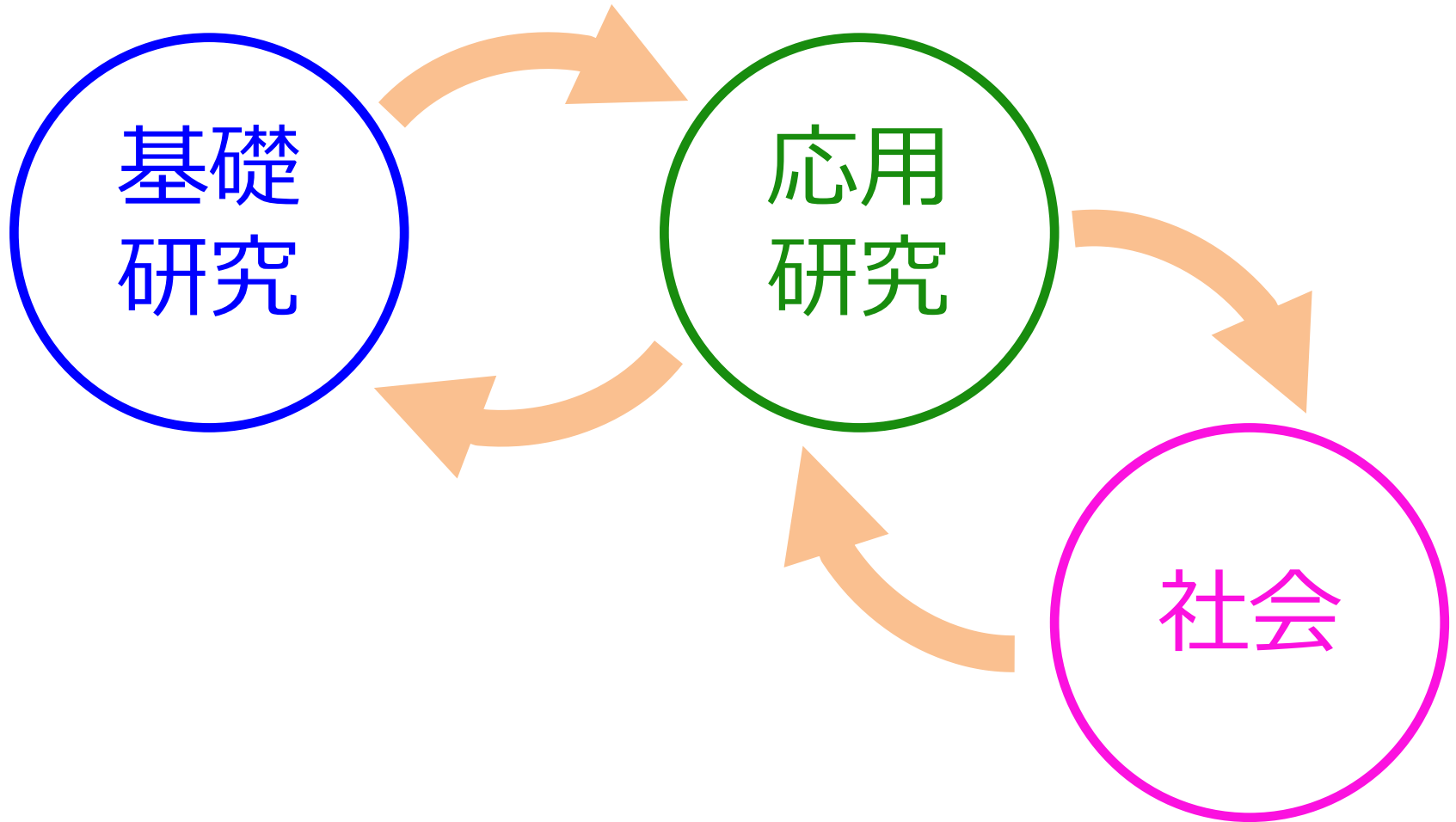
キップ・キャノン他

- 2017年ノーベル物理学賞の記者説明会@東京大学



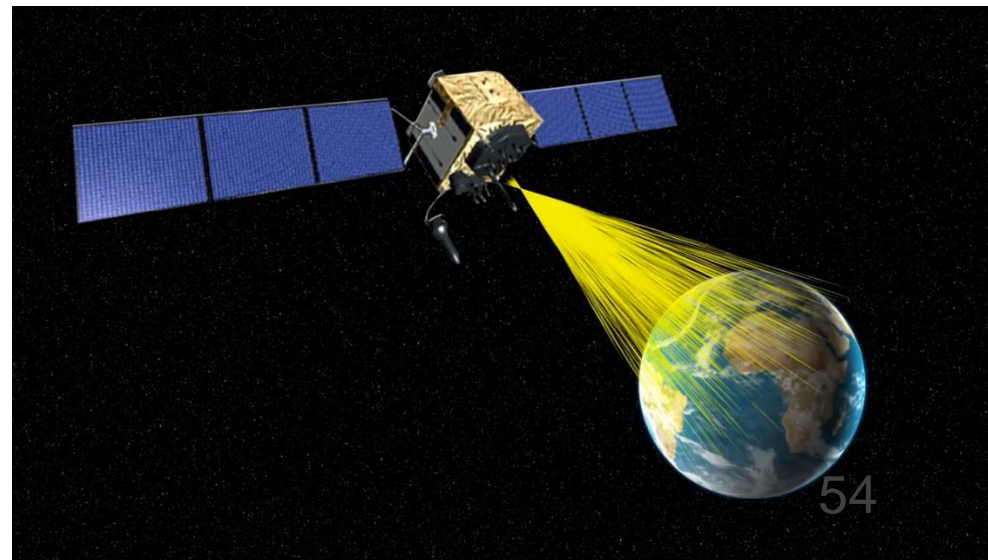
基礎研究と応用研究

- 研究にはステージがある



社会の役に立った基礎研究

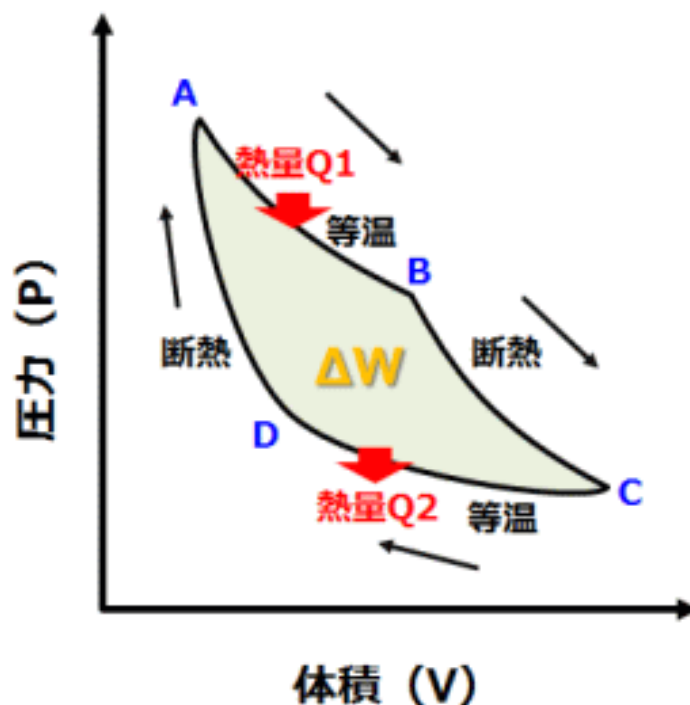
- 例えば.....
相対性理論の効果を正しく入れないと、
GPSの位置情報は1日に11kmずれてしまう
- GPS衛星の速度は4 km/s
特殊相対論の効果で時計の進み方が遅い
- GPS衛星の高度は約2万 km
一般相対論の効果で時計の進み方が早い
- 運用開始は1995年
(相対論は1915年)



応用研究から生まれた基礎研究

- 例えば.....
18世紀後半-19世紀 産業革命
よりよい**熱機関**が求められ、
熱力学・統計力学が生まれた

カルノーサイクル P-V線図



The Hon. Robert Boyle
ロバート・ボイル



Dupont de Nemours
ジャック・シャルル



ニコラ・レオナルド・サディ
・カルノー

基礎研究から生まれた応用研究

- 例えば.....

重力波検出器を用いて
地球の重力場変動をとらえ、
地震速報に使う

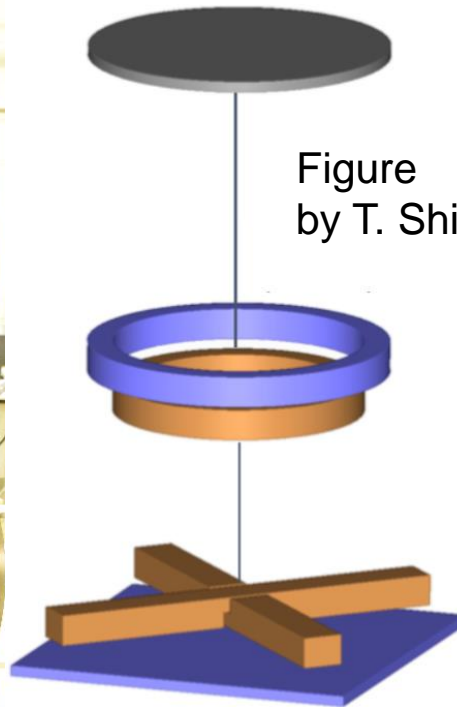
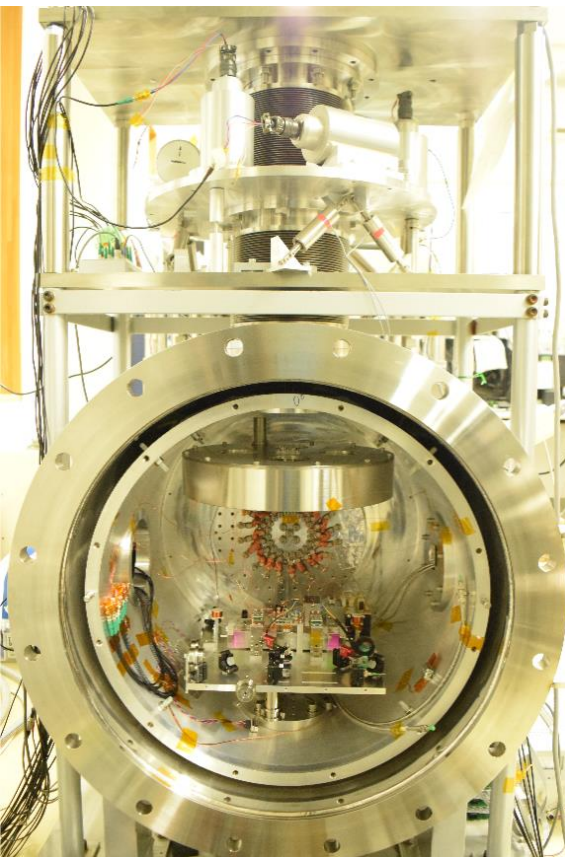
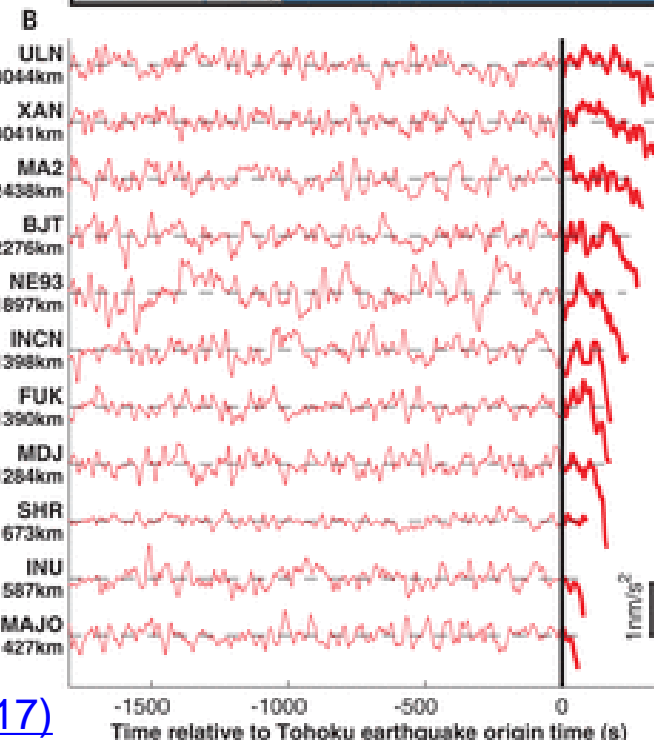


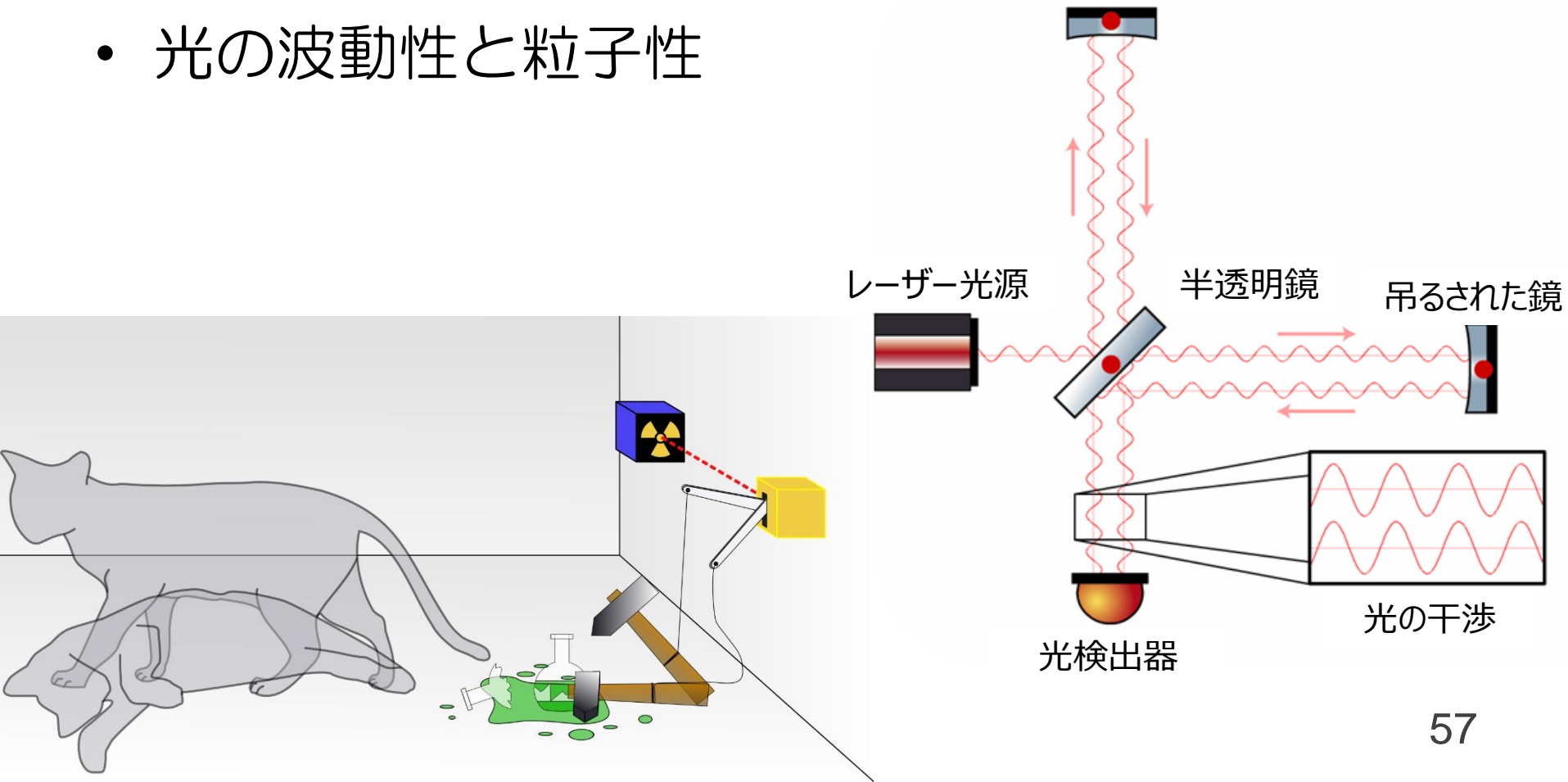
Figure
by T. Shimoda

M. Vallee et al,
[Science 358, 1164 \(2017\)](#)



基礎研究が生む別の基礎研究

- 例えば.....
 - **重力波検出器**を用いてシュレディンガーの猫状態を実現し、**量子力学**を検証する
- 光の波動性と粒子性



基礎研究をする魅力

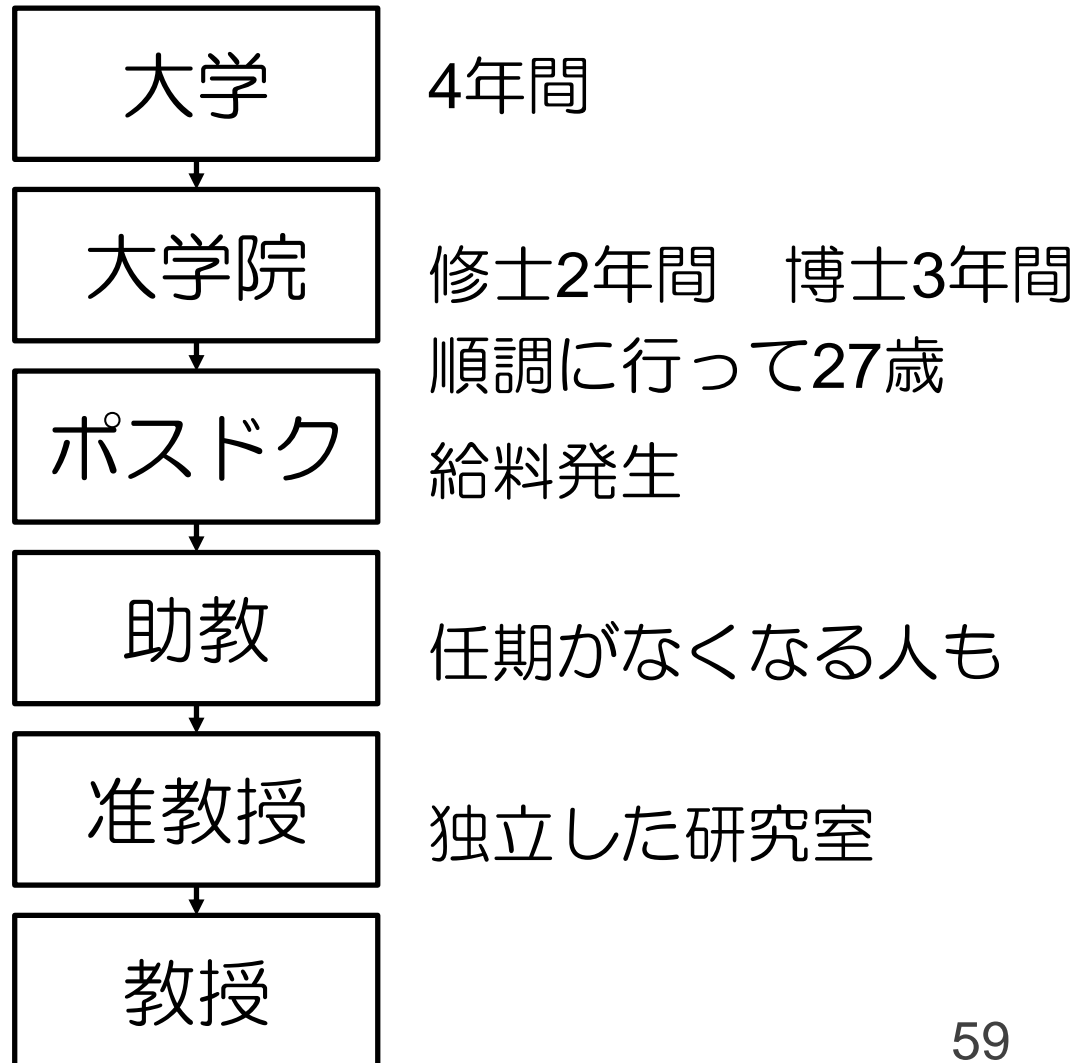
- 役に立つか役に立たないかではなく、
面白いか面白くないか
(将来役に立つかも？ともあまり考えない)
- 時間の使い方も**自由** (出張、会議など)
- ただし**研究の資金**は自分で取ってくる必要がある
たとえばKAGRAは150億円かかっている
これはもともとは税金
- みんなが面白いと思ってくれる
ことが重要



研究者になるには？

- 研究を楽しみ続けられること

- 標準的な
日本の大学の
研究者の場合



さいごに

- 今日のスライドは
<https://tinyurl.com/Michimura20181031>
- 研究は楽しいです
- 特に重力波はやばいです
- 一緒に研究しましょう
- あるいは偉くなって重力波研究を支援してください
- 質問などは下記まで！
michimura@granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp

