

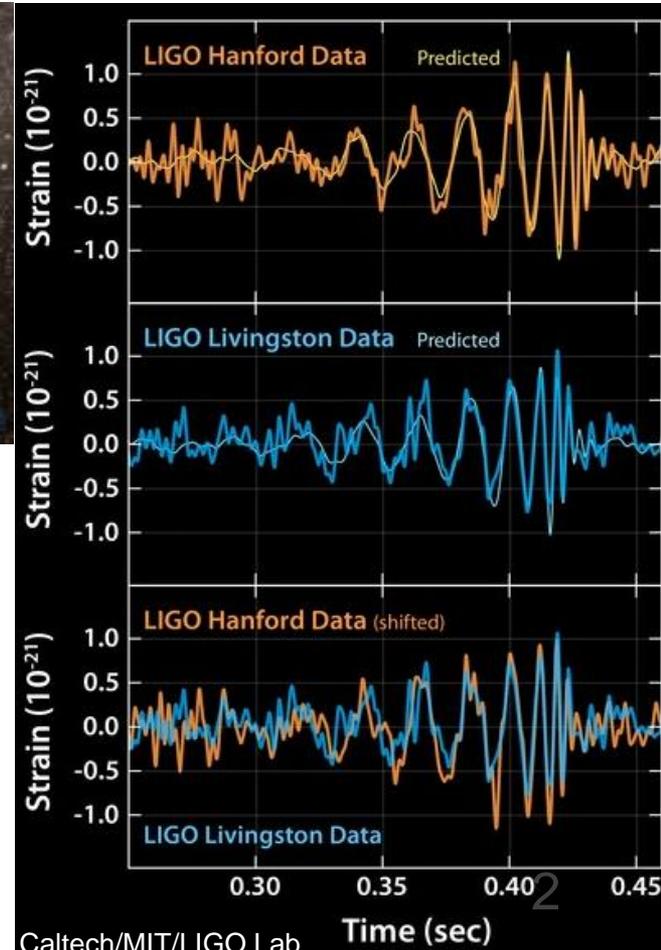
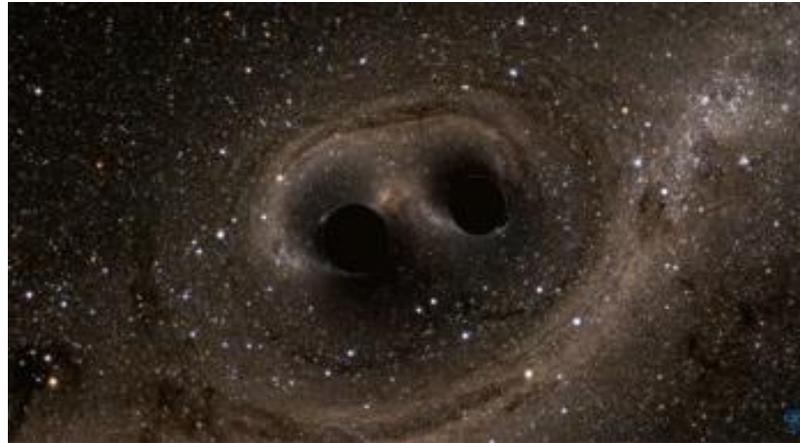
重力波望遠鏡KAGRAで聞く！ ブラックホール誕生の声

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

重力波、ついに初検出

- 2016年2月11日 アメリカのLIGOグループが発表
 - 2015年9月14日に2台の望遠鏡で同時検出
 - **ブラックホール連星の合体からの重力波**



Hanford
Observatory



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

Caltech/MIT/LIGO Lab

さらに続報

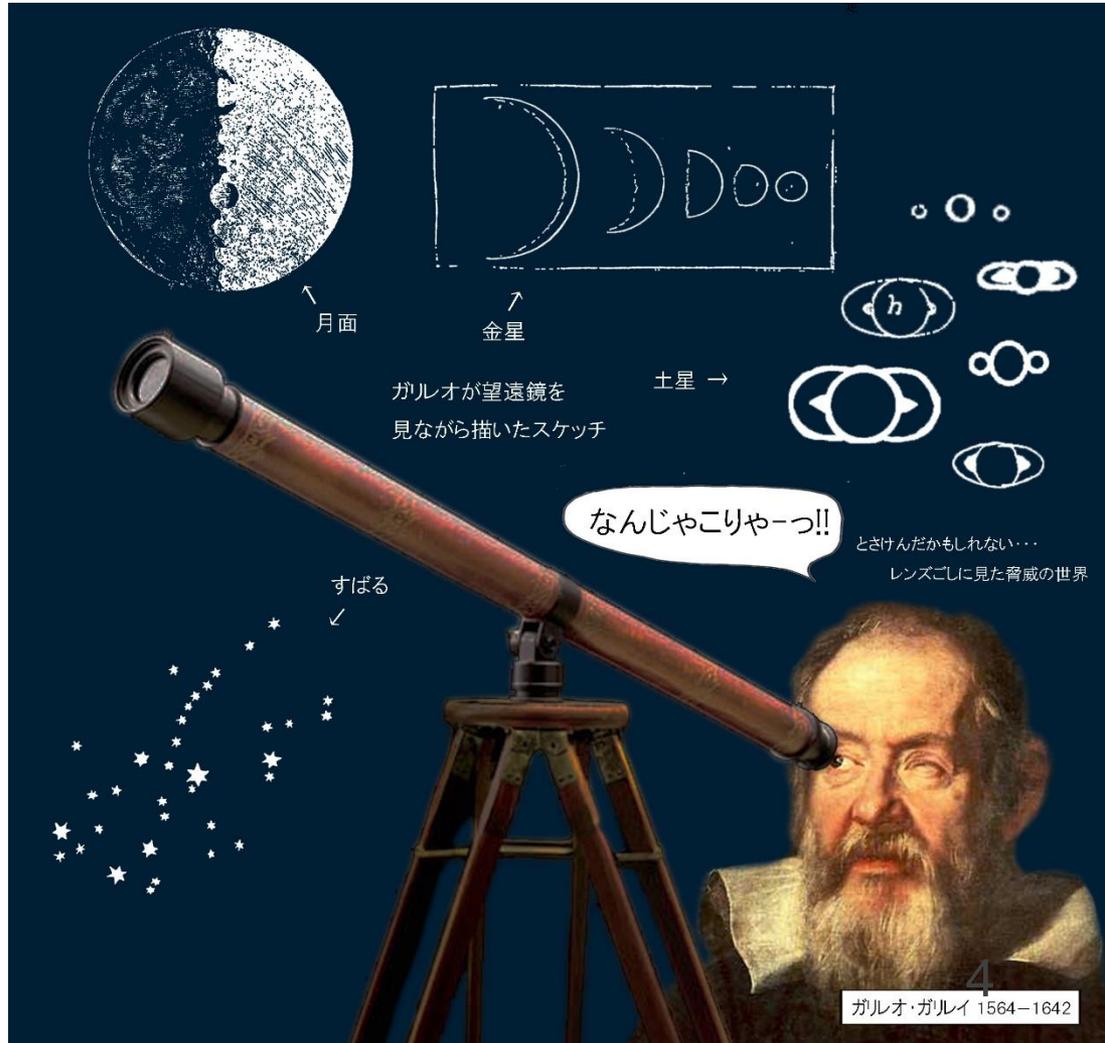
- 2016年6月15日 **2つ目**のイベント発表
 - アメリカのLIGOグループ
 - 2015年12月26日に2台の望遠鏡で同時検出
 - **ブラックホール連星の合体からの重力波**
- アインシュタインの予言から100年
- **重力波天文学**の幕開け



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



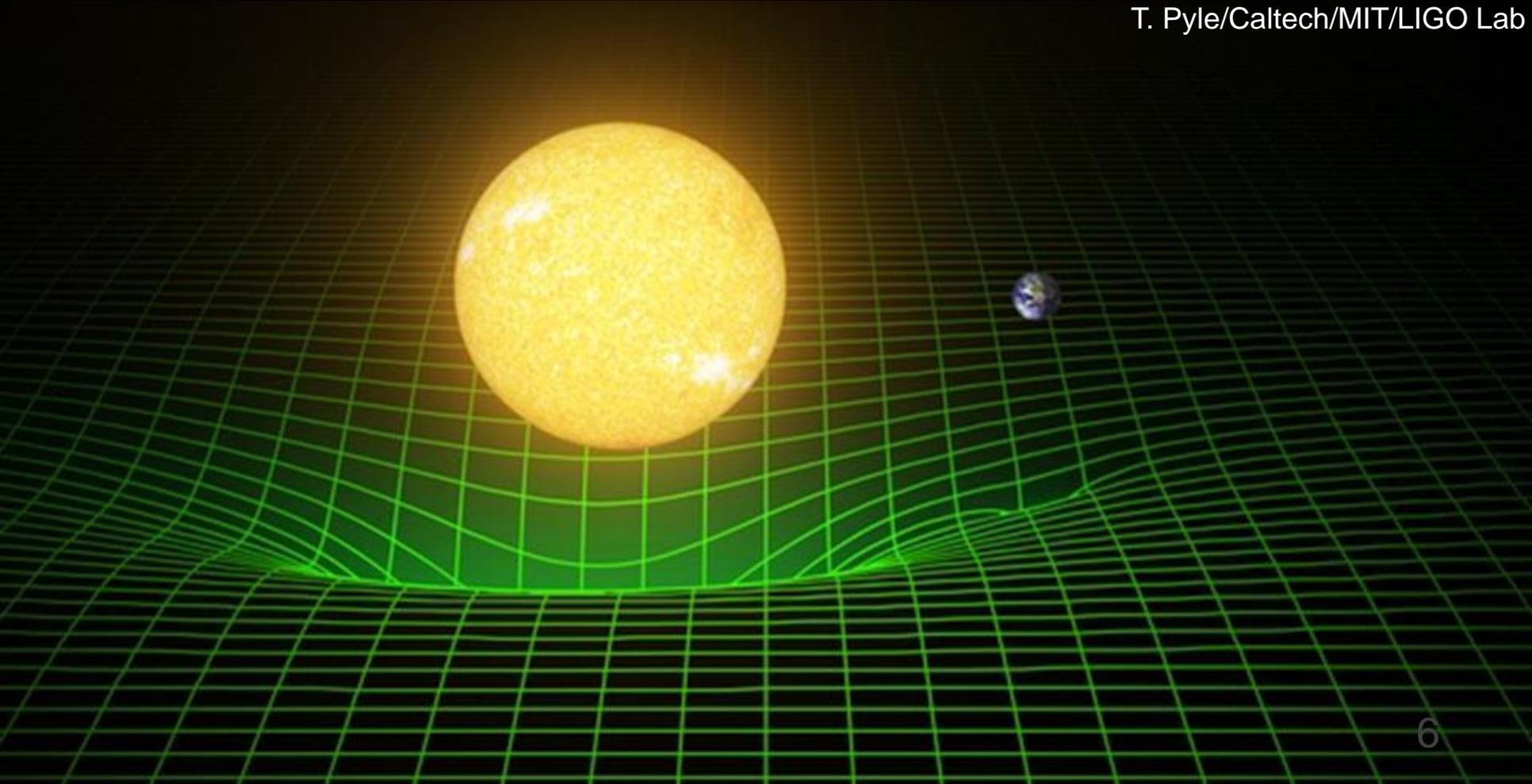
今回のお話

- **重力波とは？**
 - 一般相対性理論における重力 ← 大須賀先生の回の復習
 - 重力波を出す天体現象
 - 重力波検出の原理
- LIGOによる重力波の**初検出**
 - ブラックホールについてわかったこと
 - わからなかったこと
- 岐阜県神岡で建設中の**KAGRA(かぐら)**の紹介
 - 重力波の国際観測ネットワーク
 - KAGRA独自の技術: 低温と地下建設

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

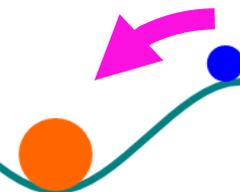
- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

なにもないトランポリンは平ら



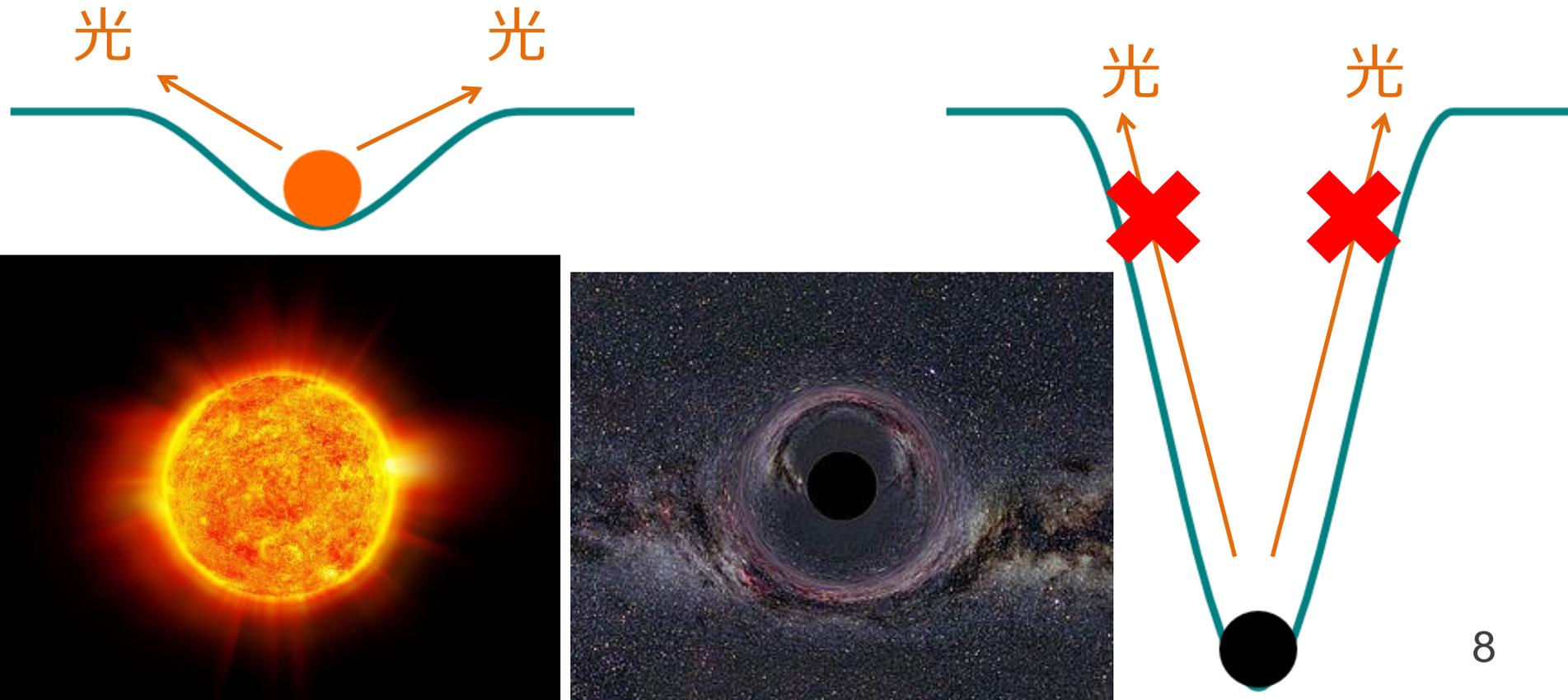
ボールを置くと
トランポリンが歪む

近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる



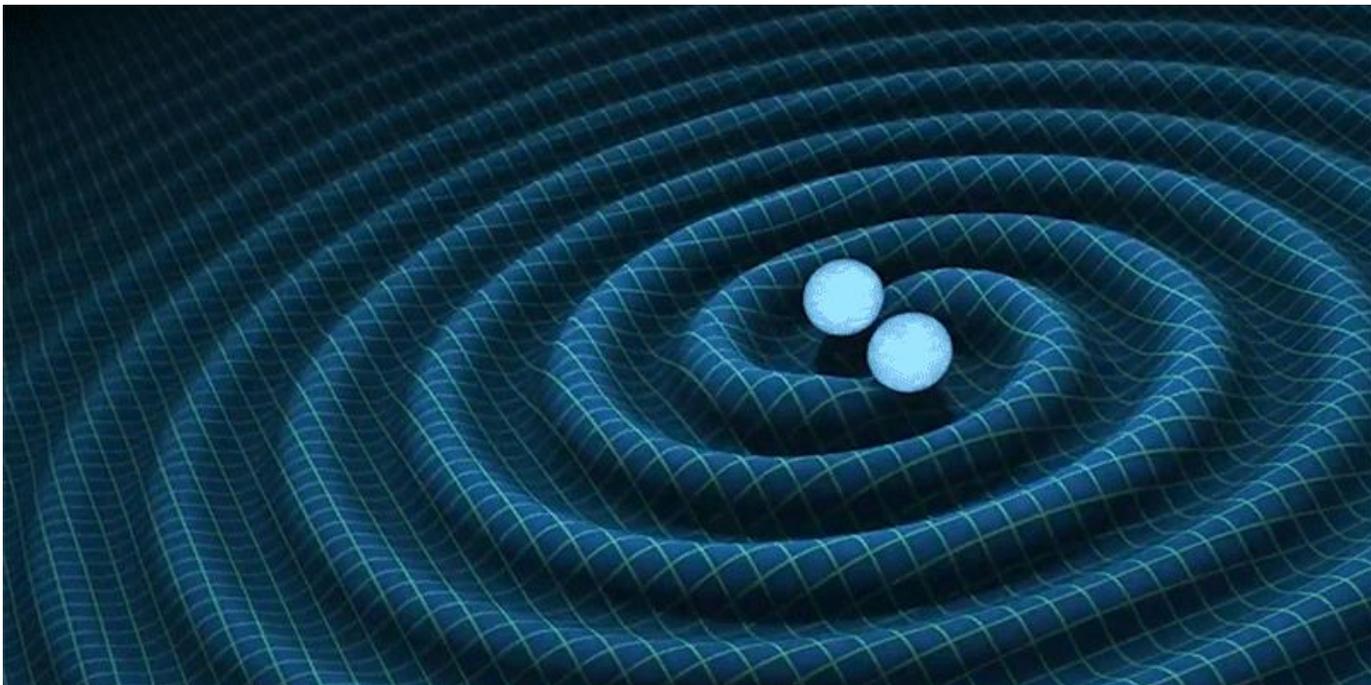
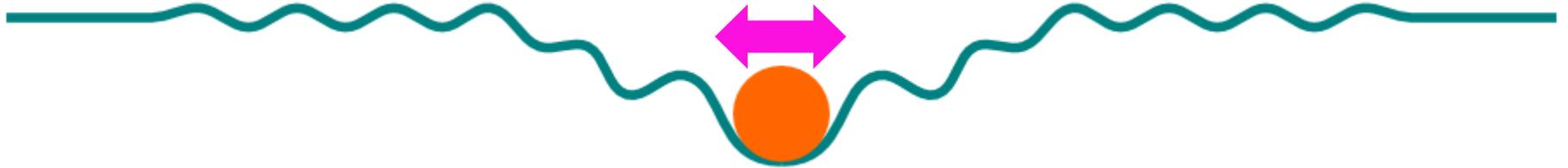
ブラックホール

- 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



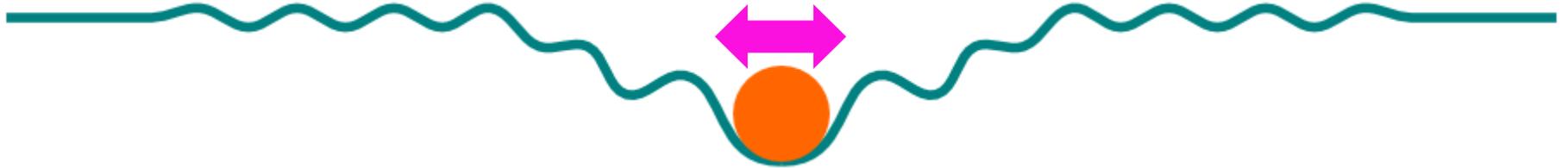
重力波は「時空のさざ波」

- 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」

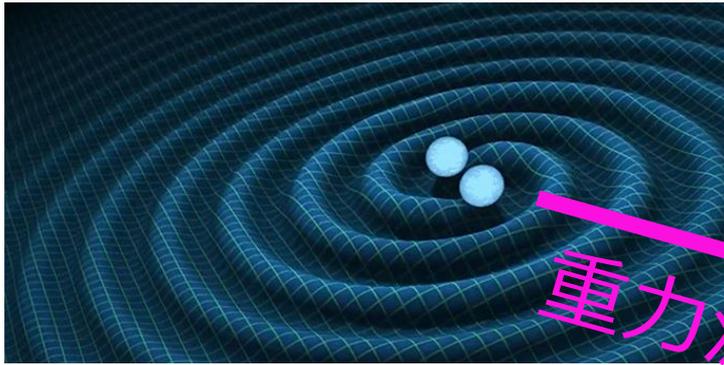
- 物体が動くと空間の歪みが増え、光の速さで伝搬する → これが重力波



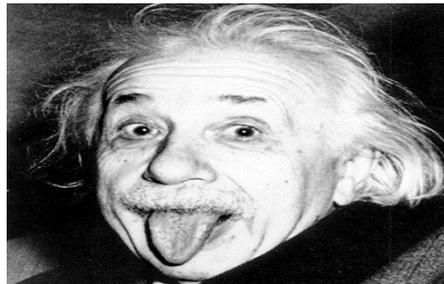
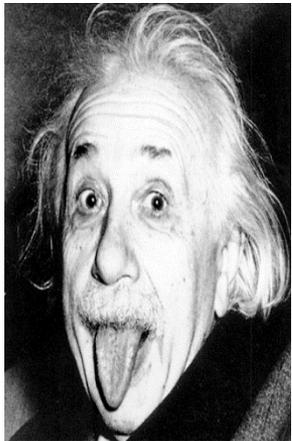
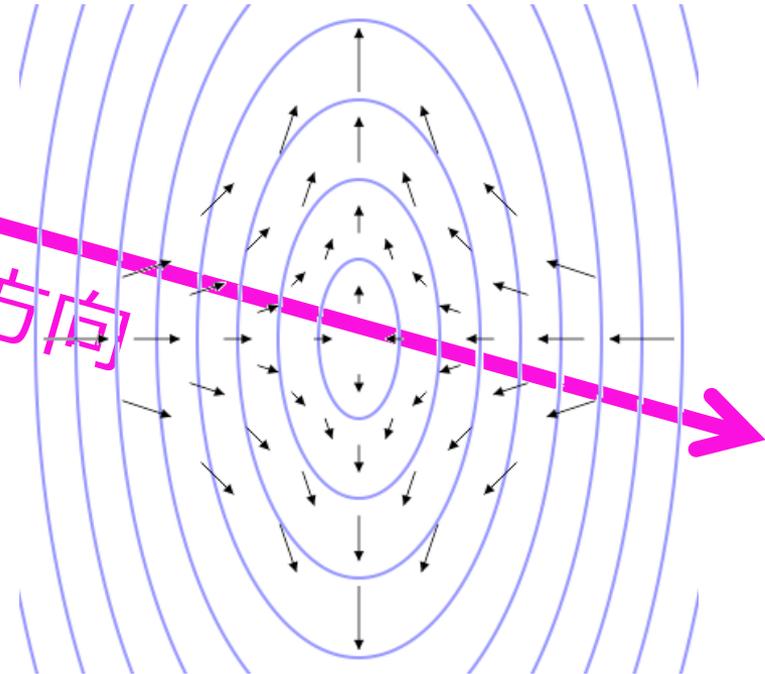
水の波紋
に似ている

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)

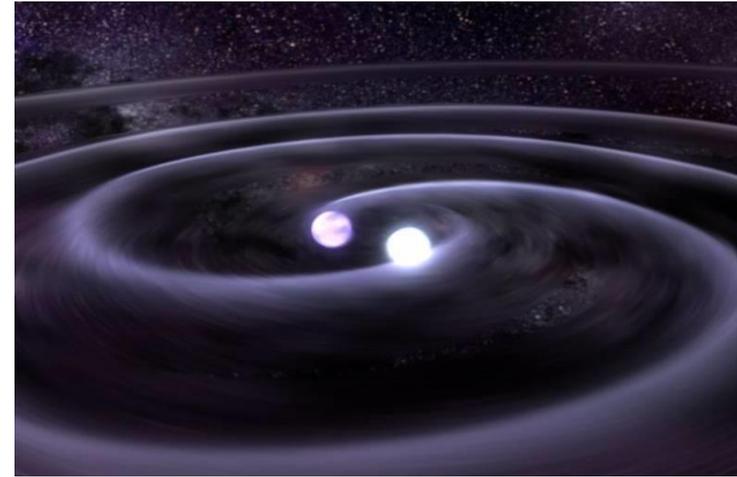


重力波の伝わる方向



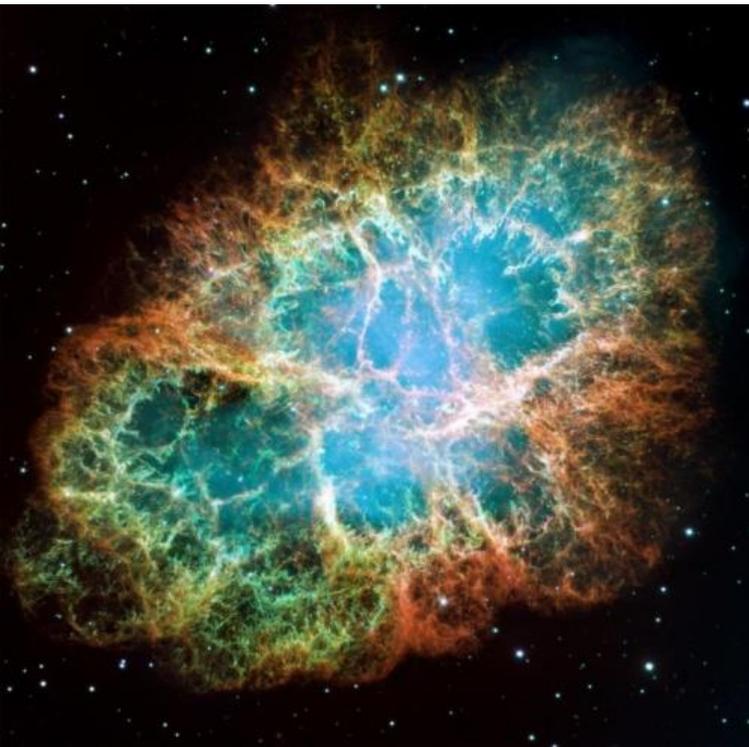
重力波源となり得る天体現象

- 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？

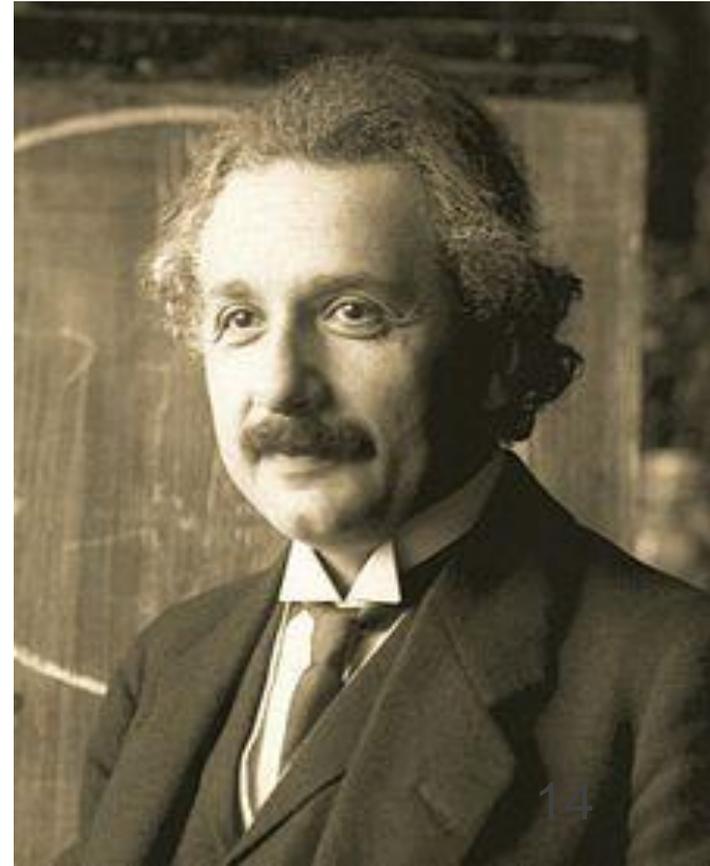
- **星の中**を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

エコー写真(音波)でお腹
の中が見えるように



最初は受け入れられなかった重力波

- 1915年 アインシュタインが一般相対性理論を発表
- 1916年 アインシュタインが重力波の存在を予言
- 1936年 アインシュタイン「間違いだった」
→ 反論され、激怒
- 1957年 チャペルヒル国際会議
重力波の存在が理論的に
認められるように
- 重力波の計算は**ものすごく**
難しい ファインマン ホイラー



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



ノーベル賞確実

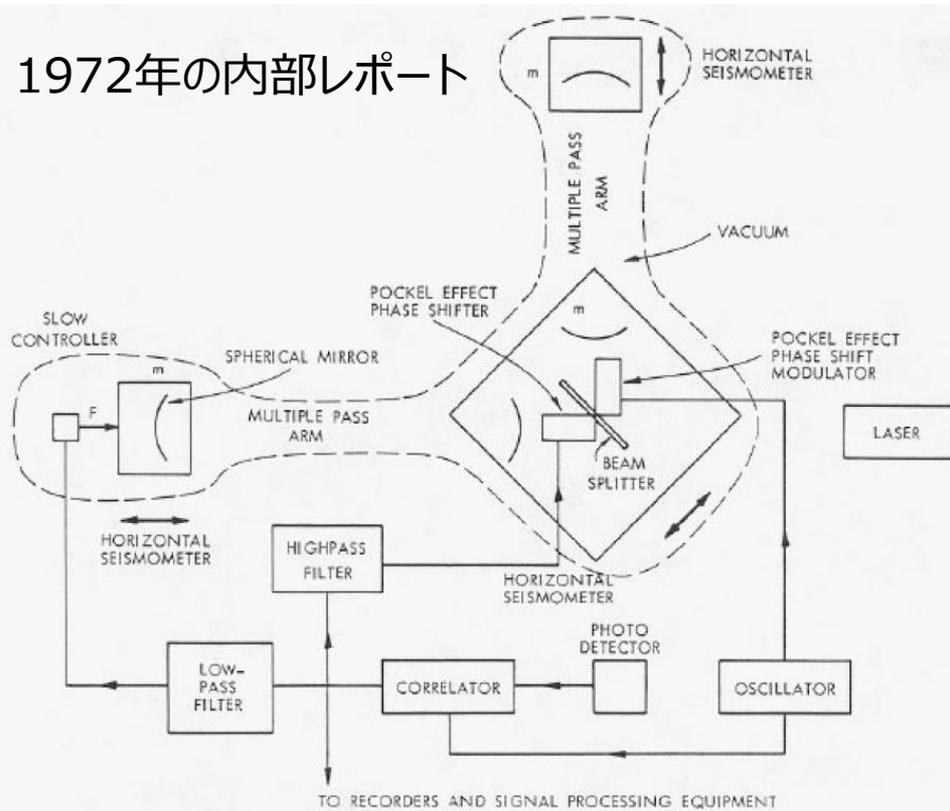
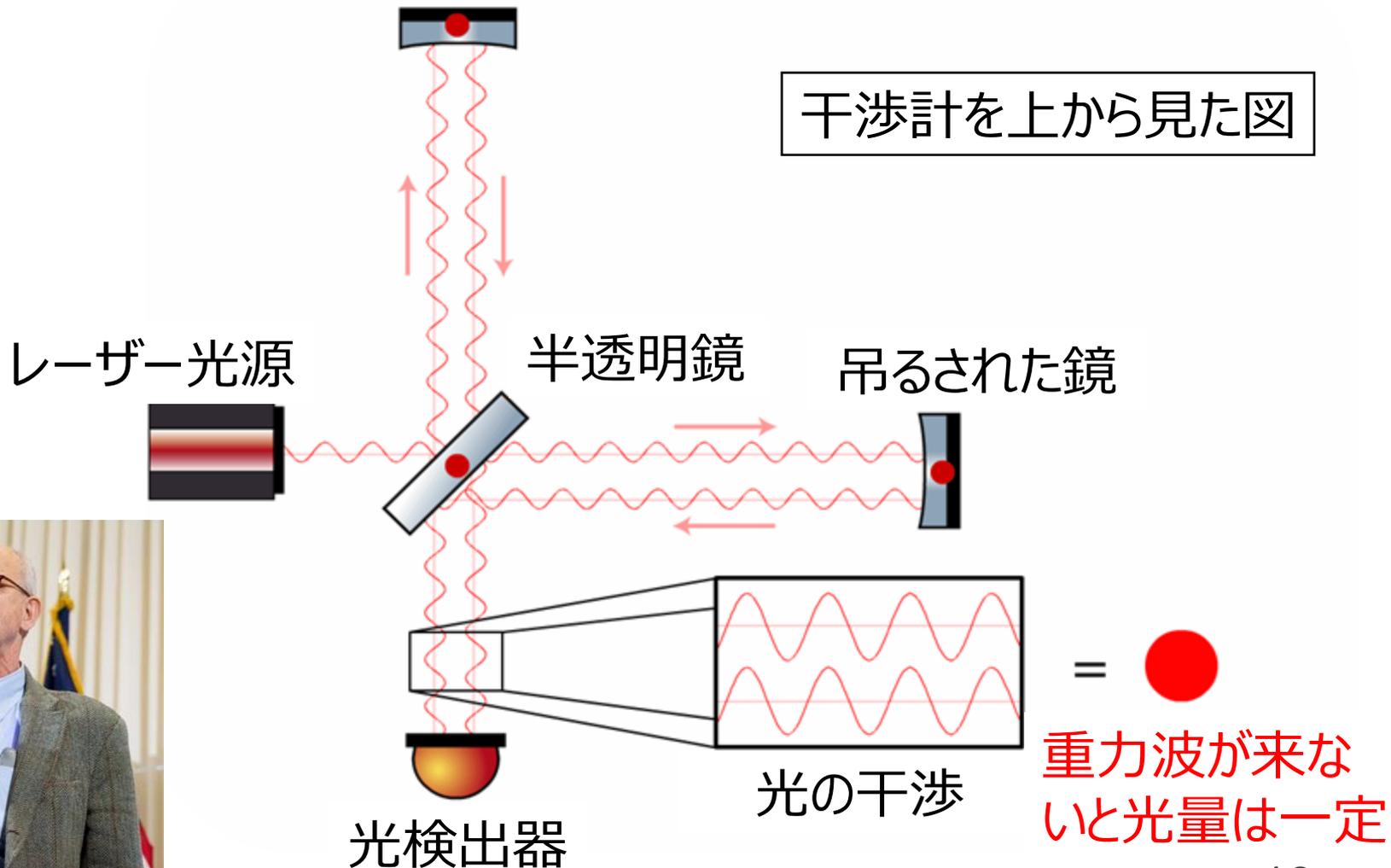


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



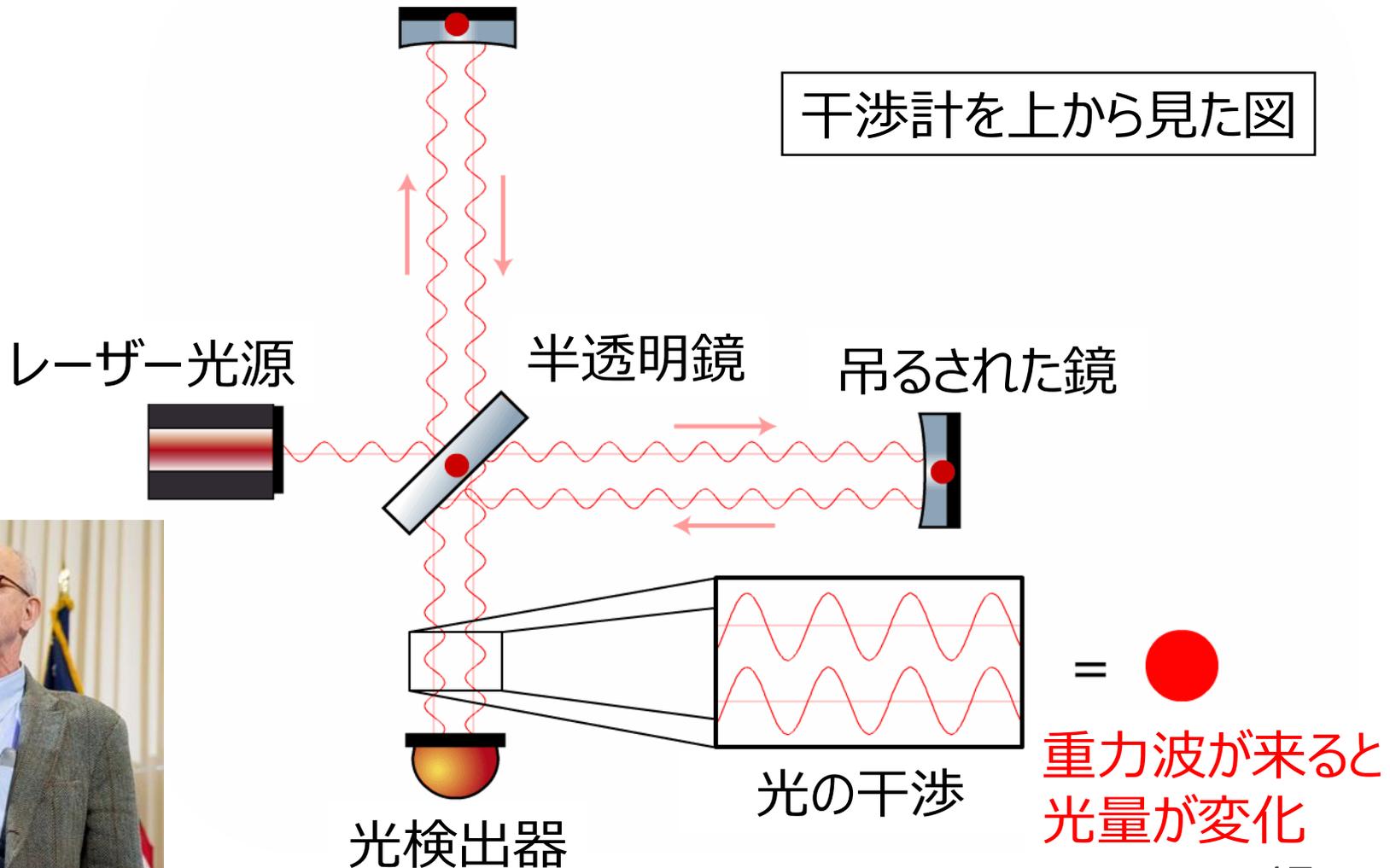
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



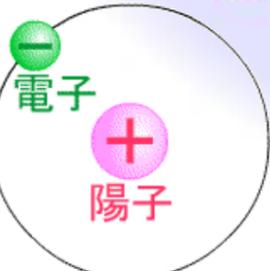
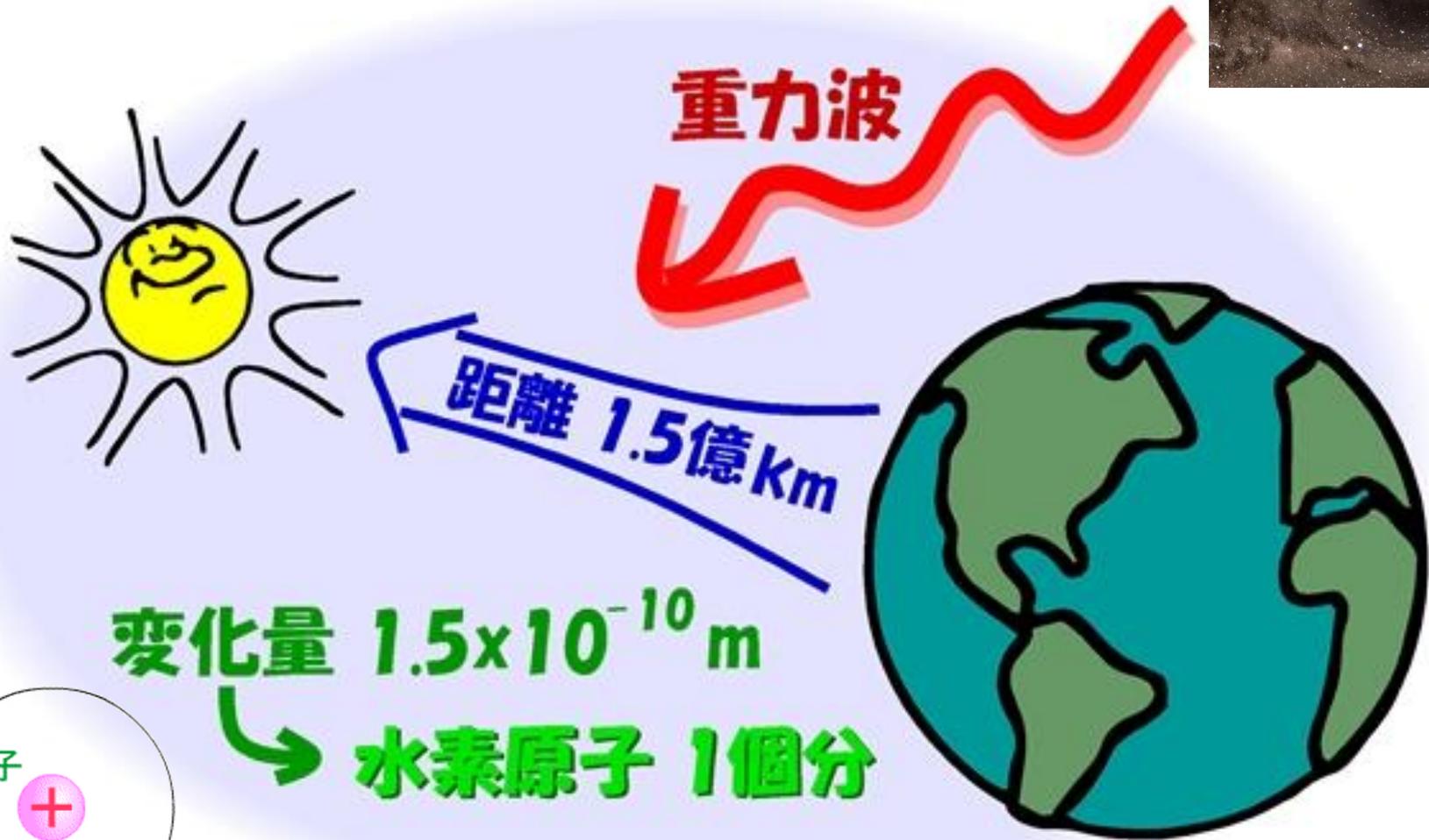
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



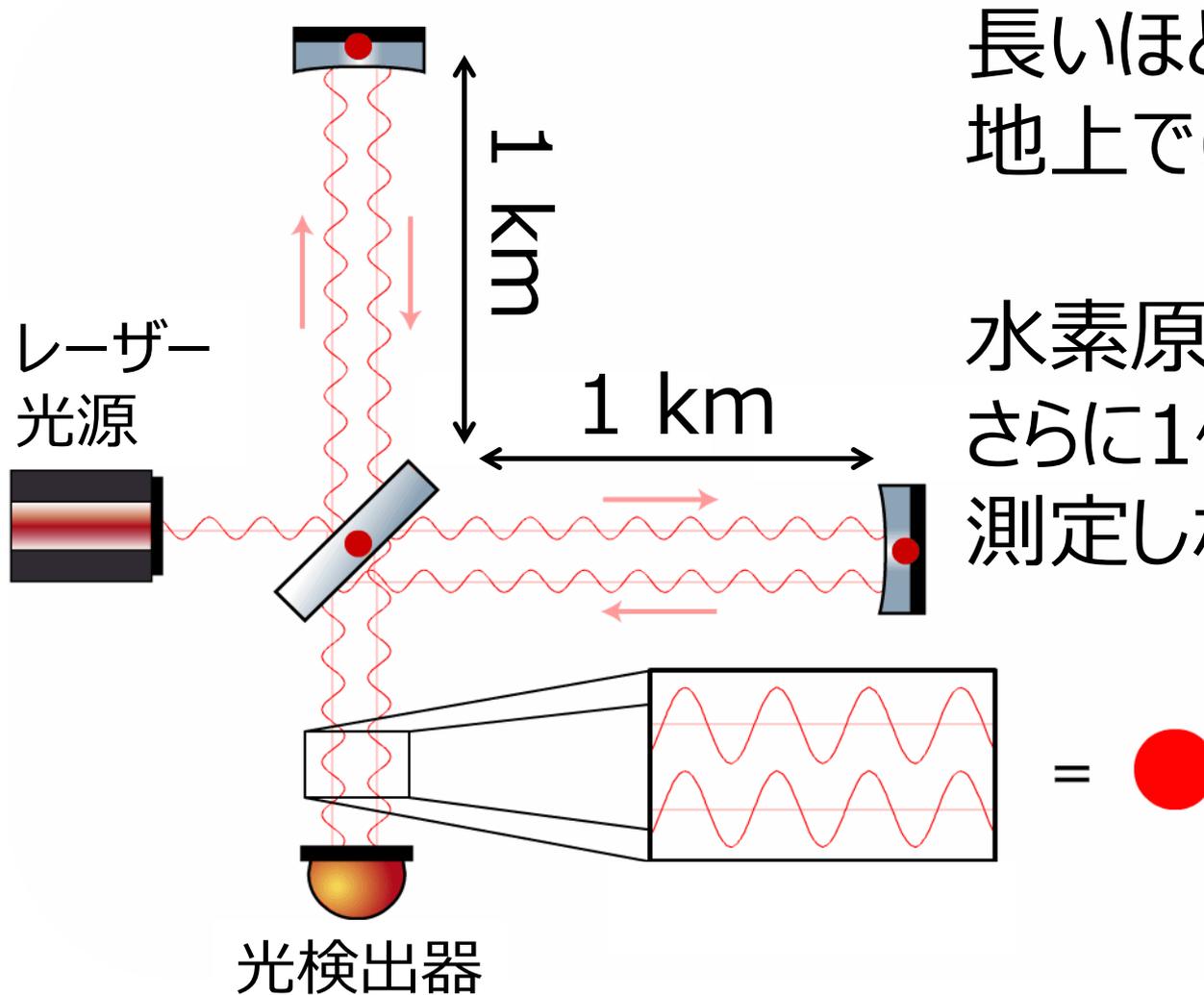
重力波の振幅はどれくらい？

- 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)



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

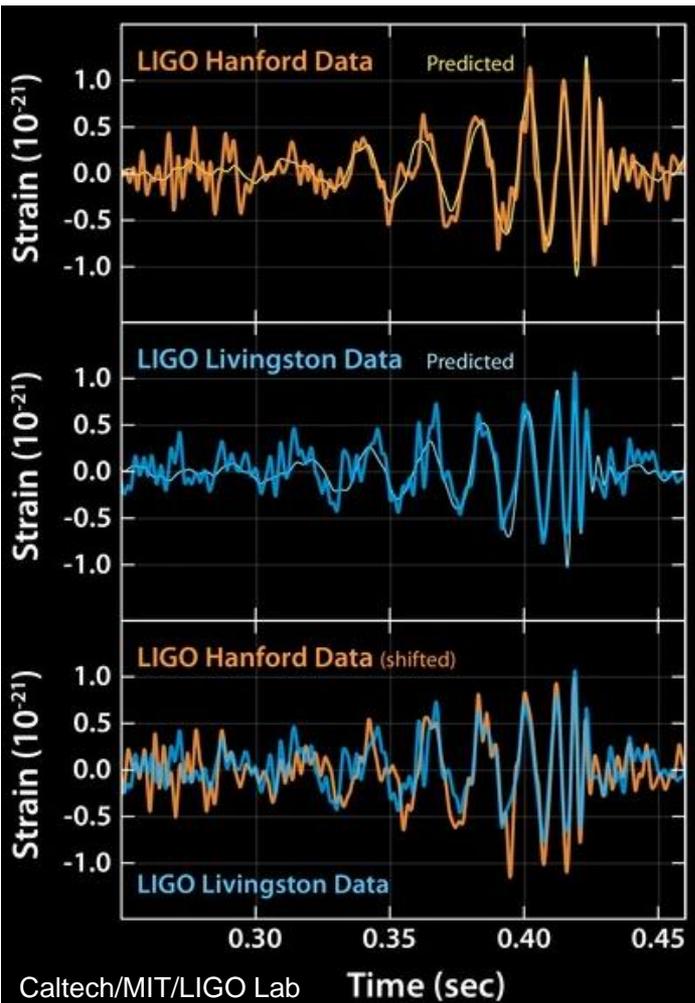
- 1916年 アインシュタインが重力波を**予言**
- 1960年代 ヴァイスが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始
LIGO (アメリカ 4km)、TAMA300 (日本 300m)、
GEO600 (ドイツ 600m)、Virgo (イタリア 3km)
→ 重力波は**見つからず**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 改良型LIGOが初稼働
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表
**予言から100年、
提案から50年！**

初検出を発表するライツィー

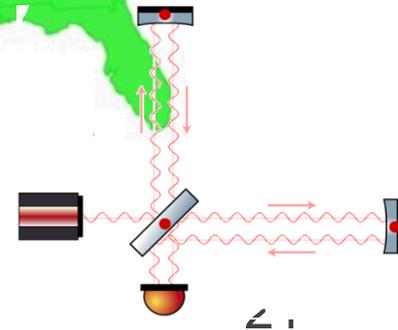


アメリカのLIGOによる初検出

- 3000 km離れた2台の望遠鏡でほぼ同時に同じ波形を検出

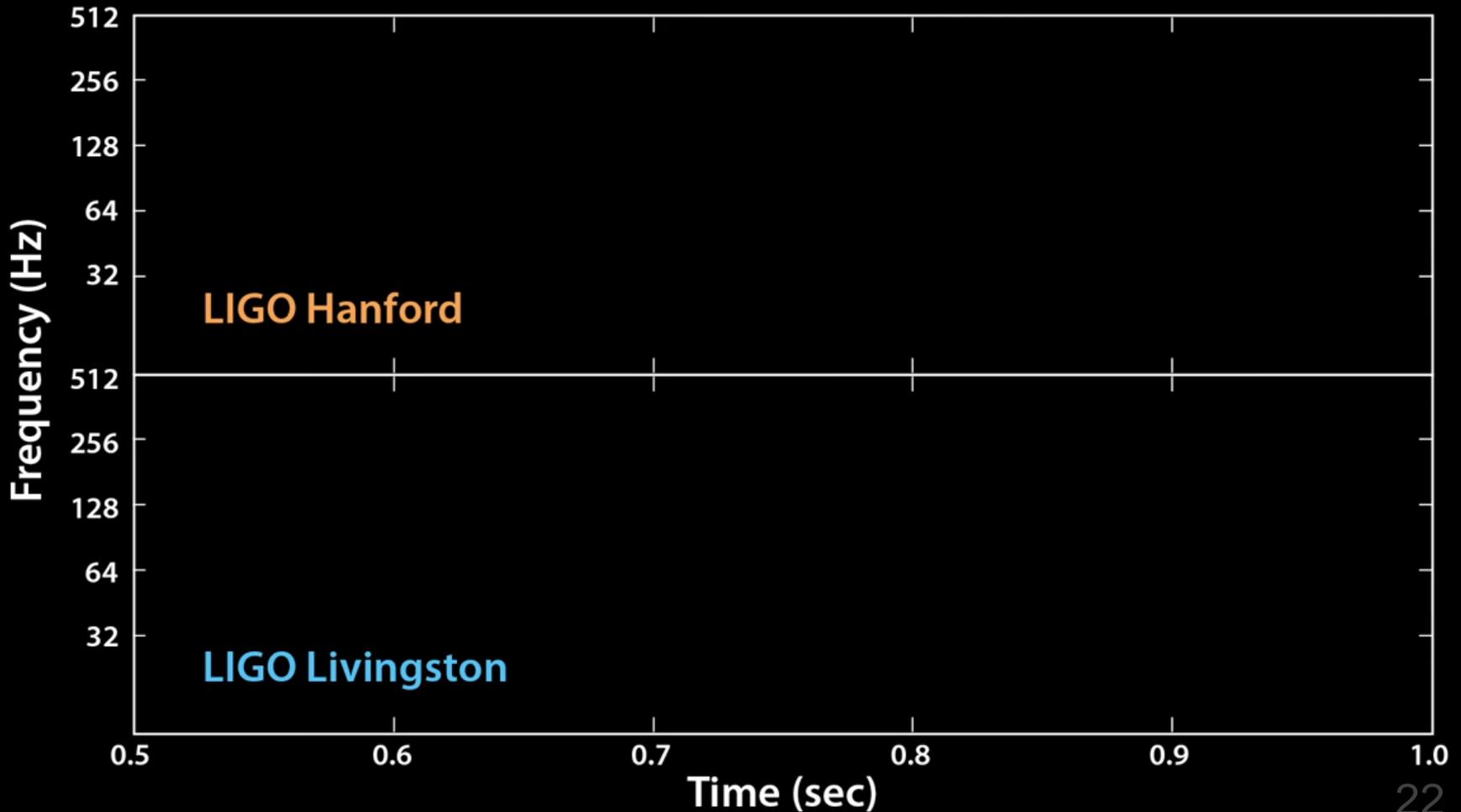


ハンフォード
観測所



検出した信号を音にすると？

- 低い元々の音、聴きやすいように処理した高い音



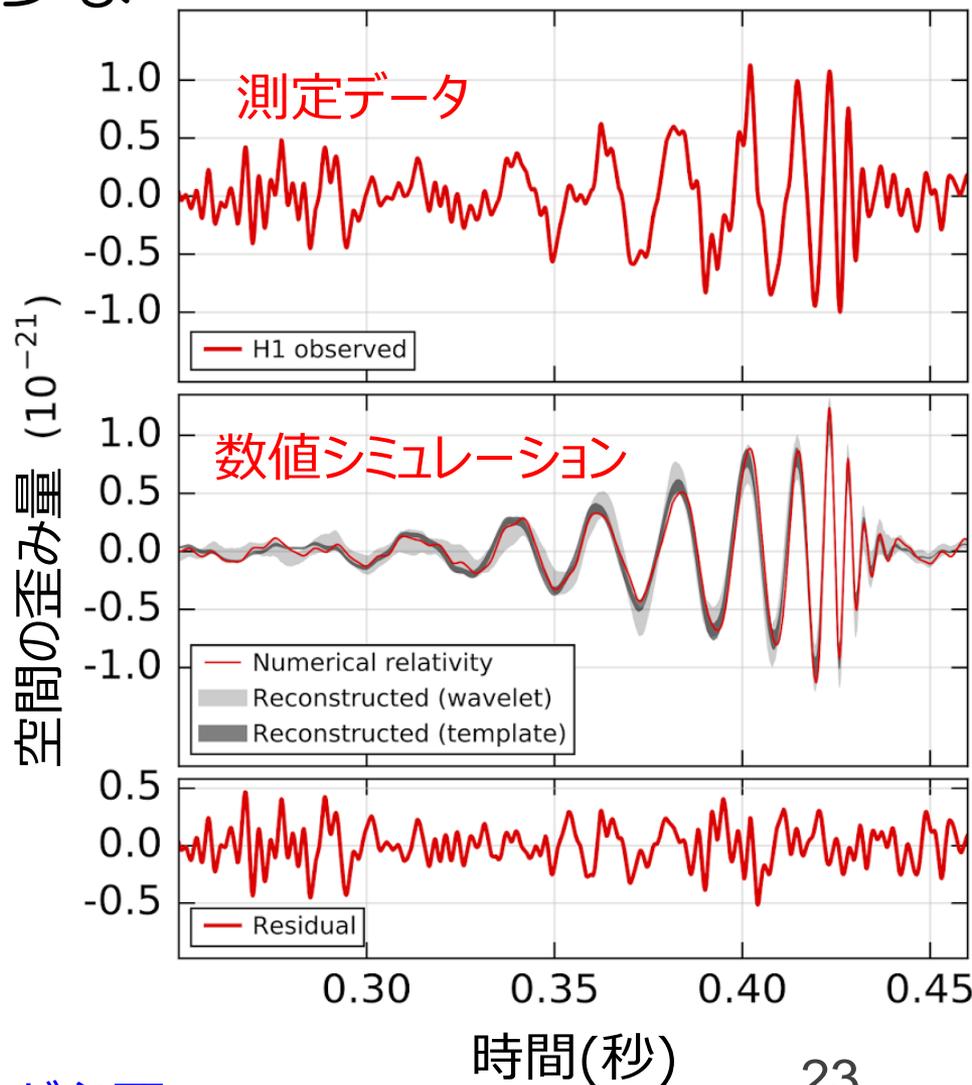
波形が相対論の計算とぴったり

- 見てわかる教科書のような波形 (驚き その1)
- 理論物理学、
数値シミュレーション
の大勝利



重力波の波形の計算にはスーパーコンピュータが必要

Hanford, Washington (H1)



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

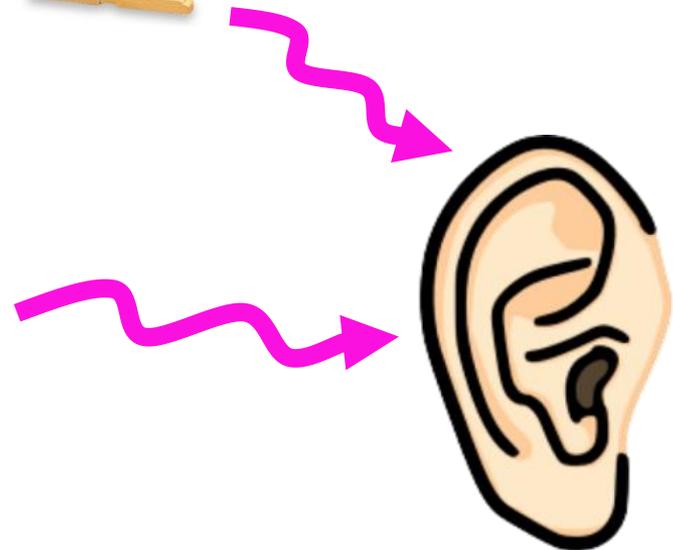
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

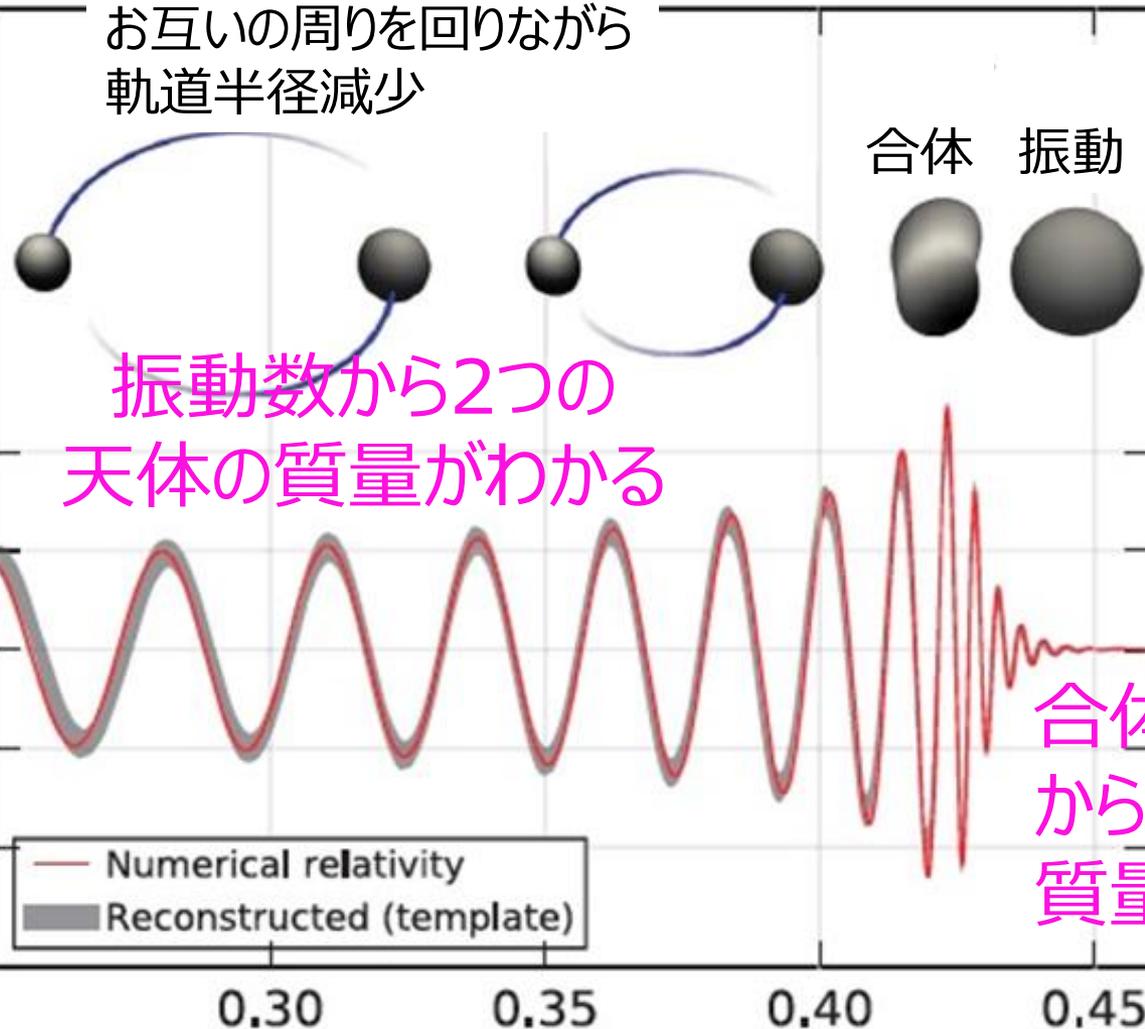


重力波形から何がわかるか？

- 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

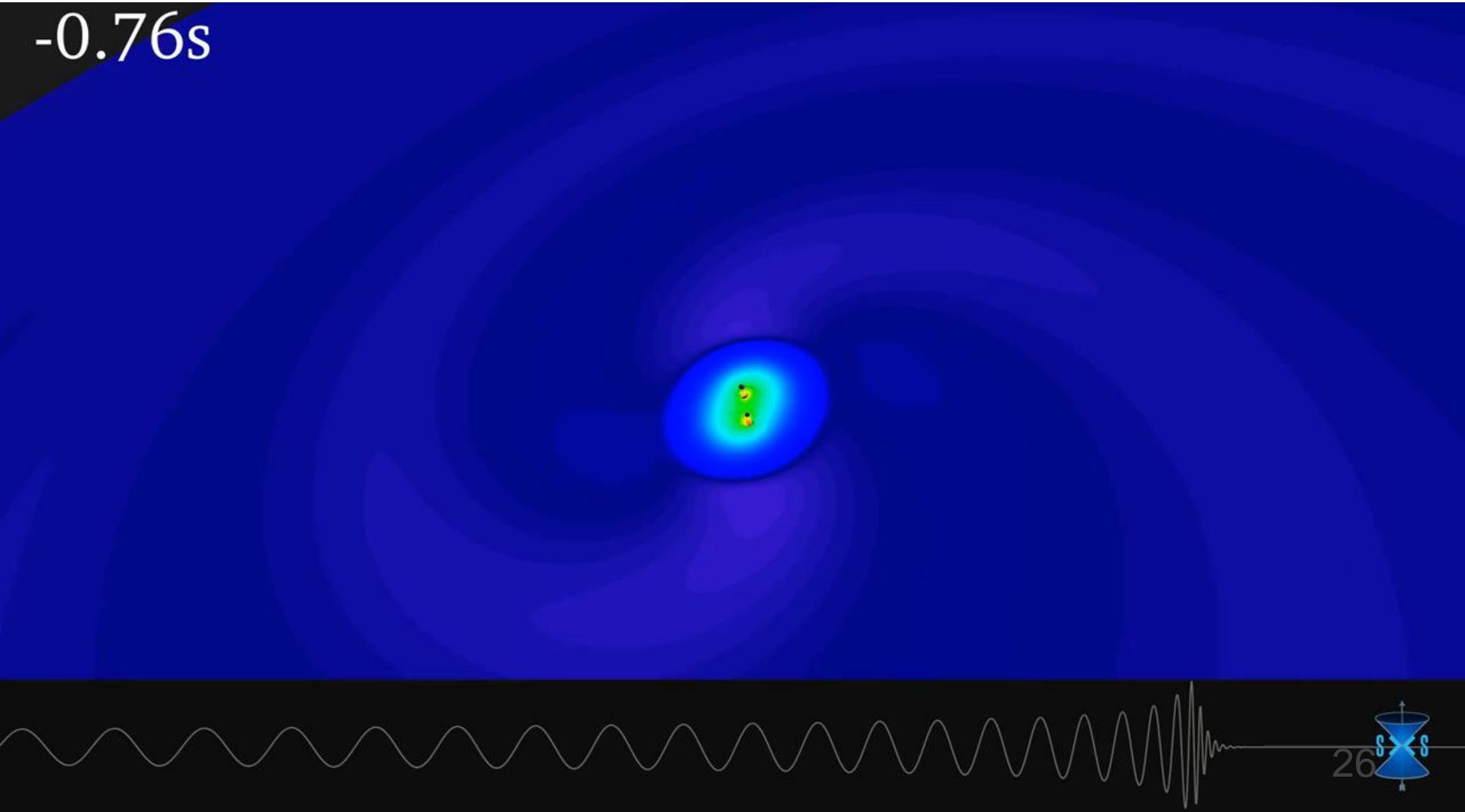
振動数から2つの
天体の質量がわかる

合体後の波形
から合体後の
質量がわかる

重力波形から何がわかるか？

- 天体の質量と距離がわかる

-0.76s

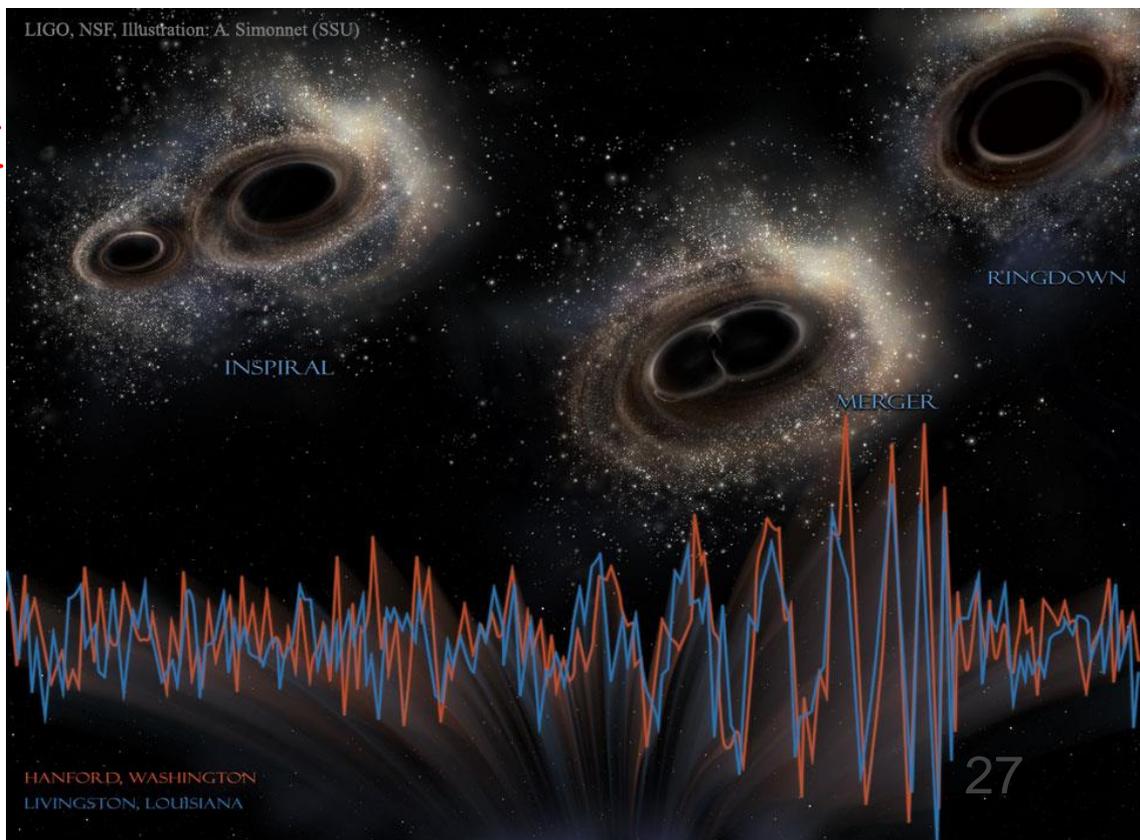
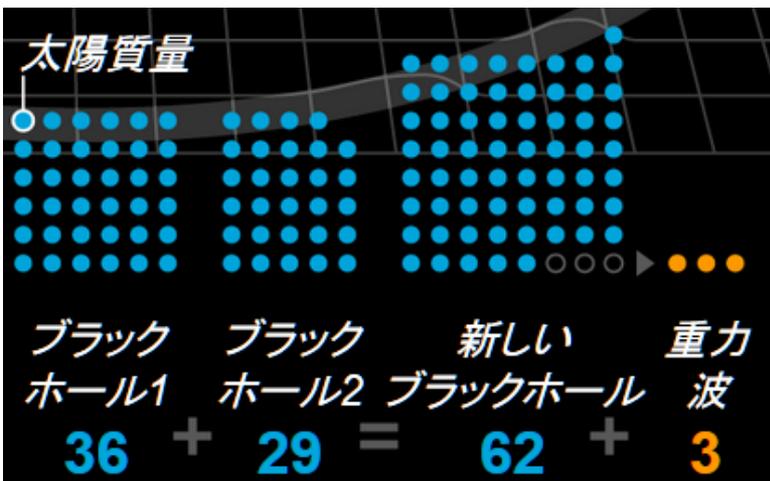


重力波形からわかったこと

- 太陽質量の**36倍**と**29倍**が合体して **62倍**に(驚き その2)
→ **ブラックホール**と判明 (驚き その3)
- 太陽質量の3倍相当のエネルギーが重力波として放出
- 地球から**13億光年**

エネルギー 質量

$$E = mc^2$$

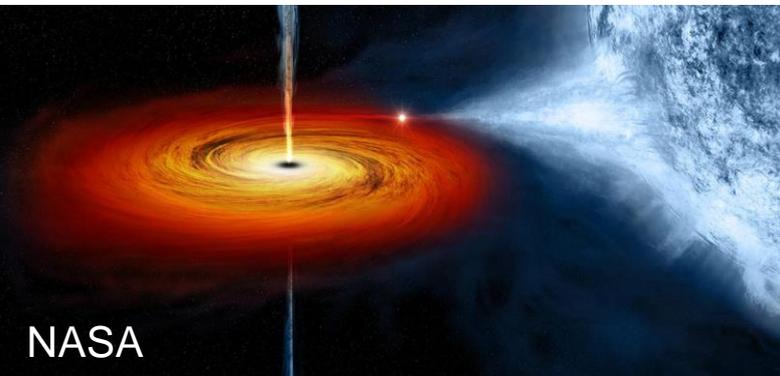


ブラックホール質量の謎

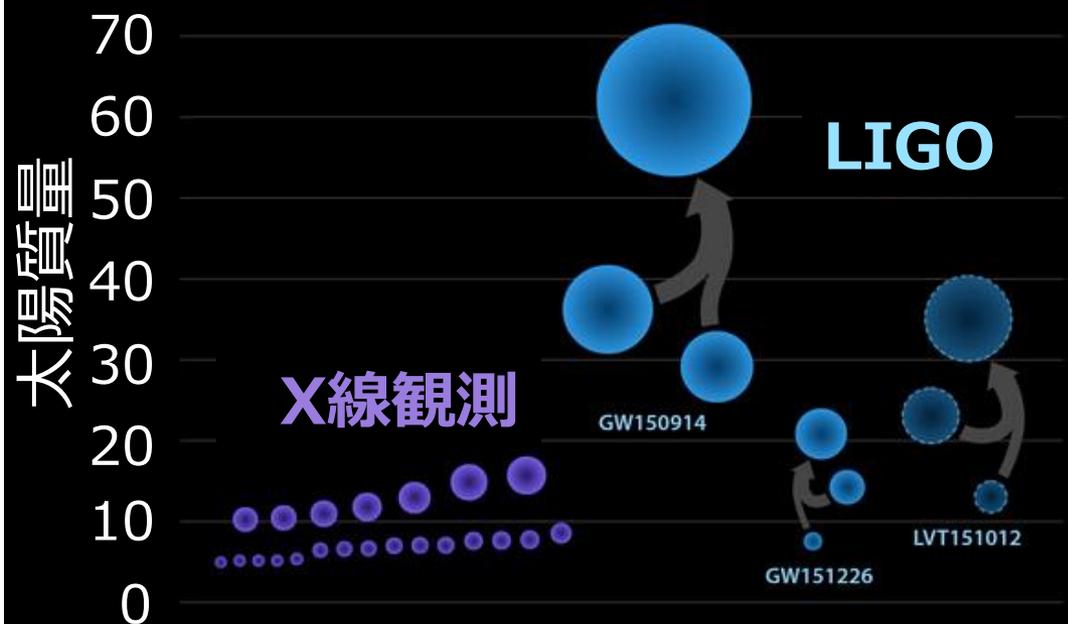
- これまでX線の観測で見つかったブラックホールはせいぜい10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか？

近くに星があるとX線でも
ブラックホールの存在が
間接的にわかる

(海老沢先生の回)

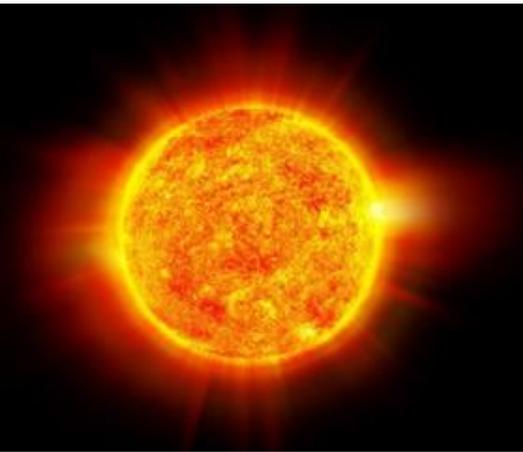


質量がわかっているブラックホール

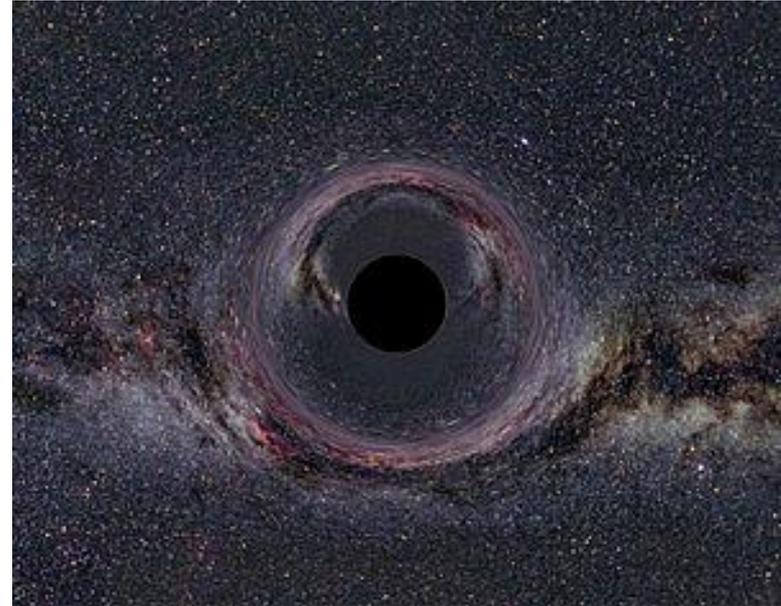


ブラックホールはどうできる？

- 普通は10太陽質量程度以下の小さなブラックホールしかできない

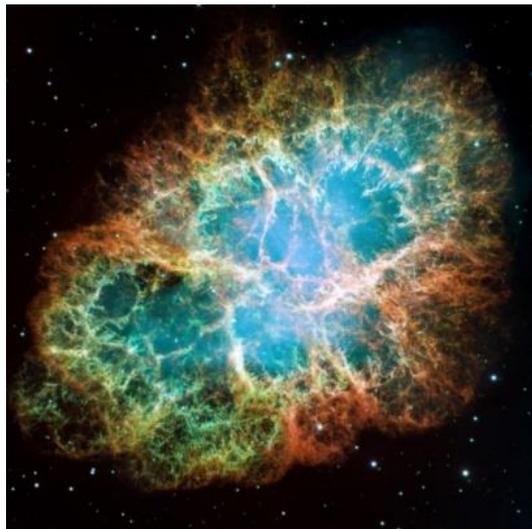


普通の星



10太陽質量
程度以下の
ブラックホール

歳を取ると



超新星爆発

重力収縮

ブラックホールはどうできる？

- では30太陽質量程度のブラックホールは？
- 結構な頻度で生成されているはず
- いろいろな説が唱えられている

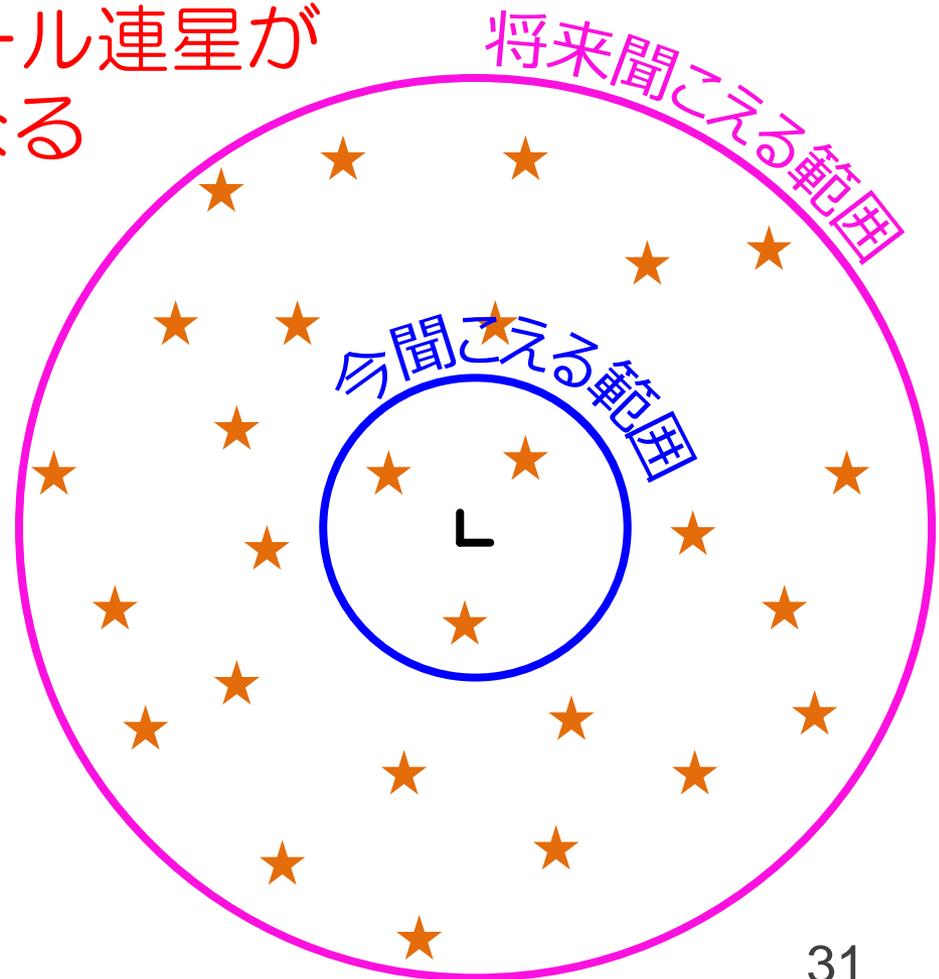
宇宙初期にできた
大きな初代星から？

宇宙初期の
密度ゆらぎから？

球状星団の中でできた？

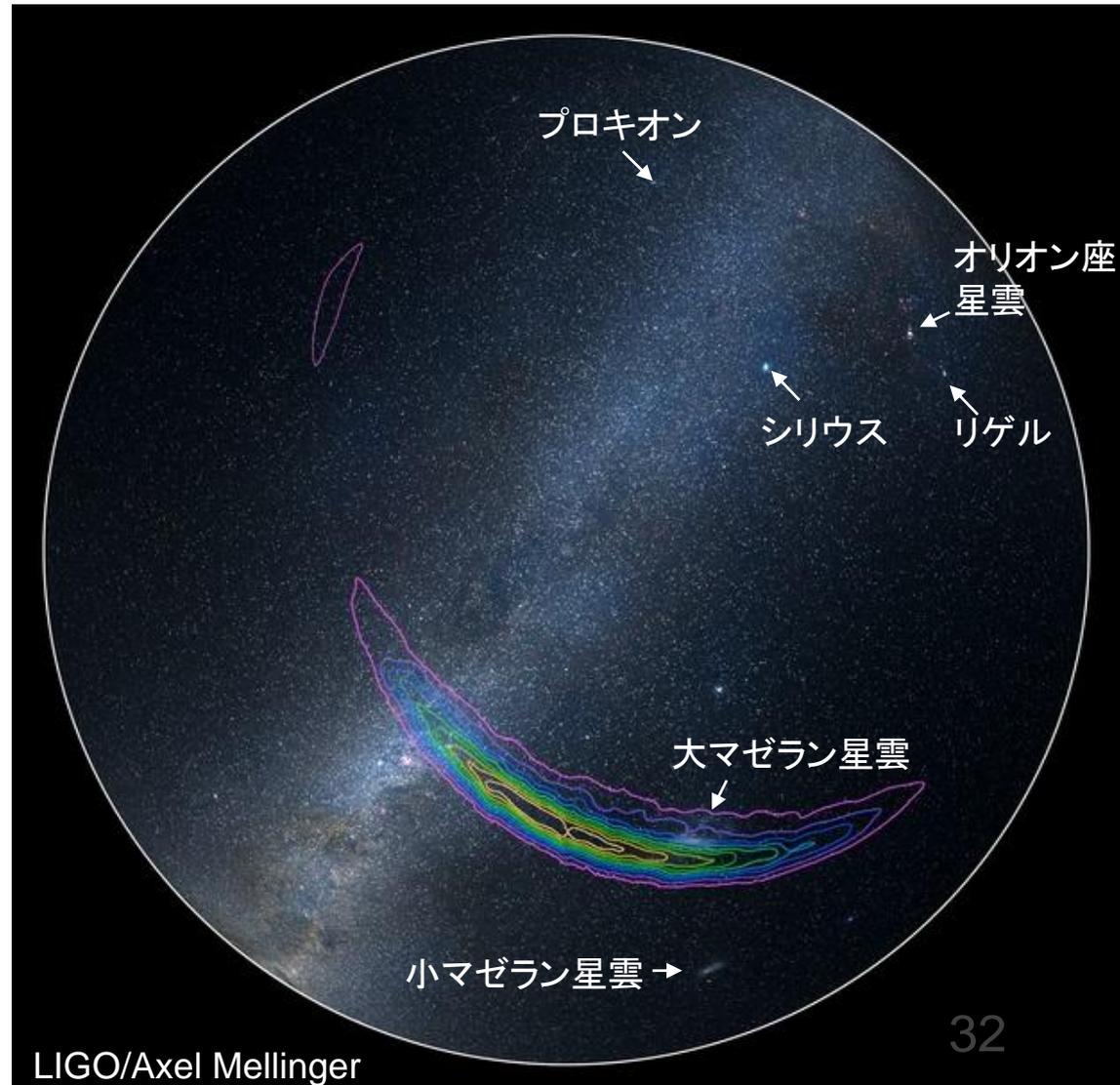
今後の展望

- LIGOは今後2-3年で感度を3倍にする予定
 - 3倍遠くまで観測できる
 - 27倍ブラックホール連星が見つかりやすくなる
- ブラックホール連星がたくさん見つかりると、質量分布や年に何個できるかが精度よくわかる
 - ブラックホールがどう生まれるのかがわかる



重力波はどこから来たのか

- LIGOの2台の検出器では**到来方向があまり特定できない**
- 約600平方度
満月の3000倍
の広さ
冬の大三角形
の2倍の広さ



波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

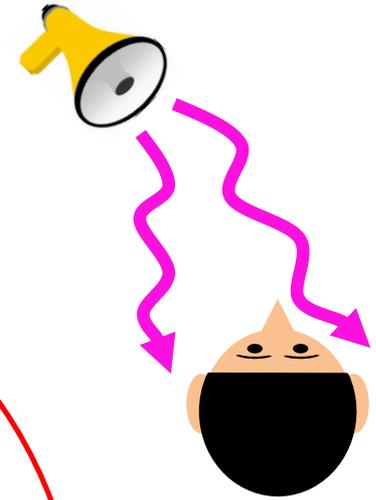
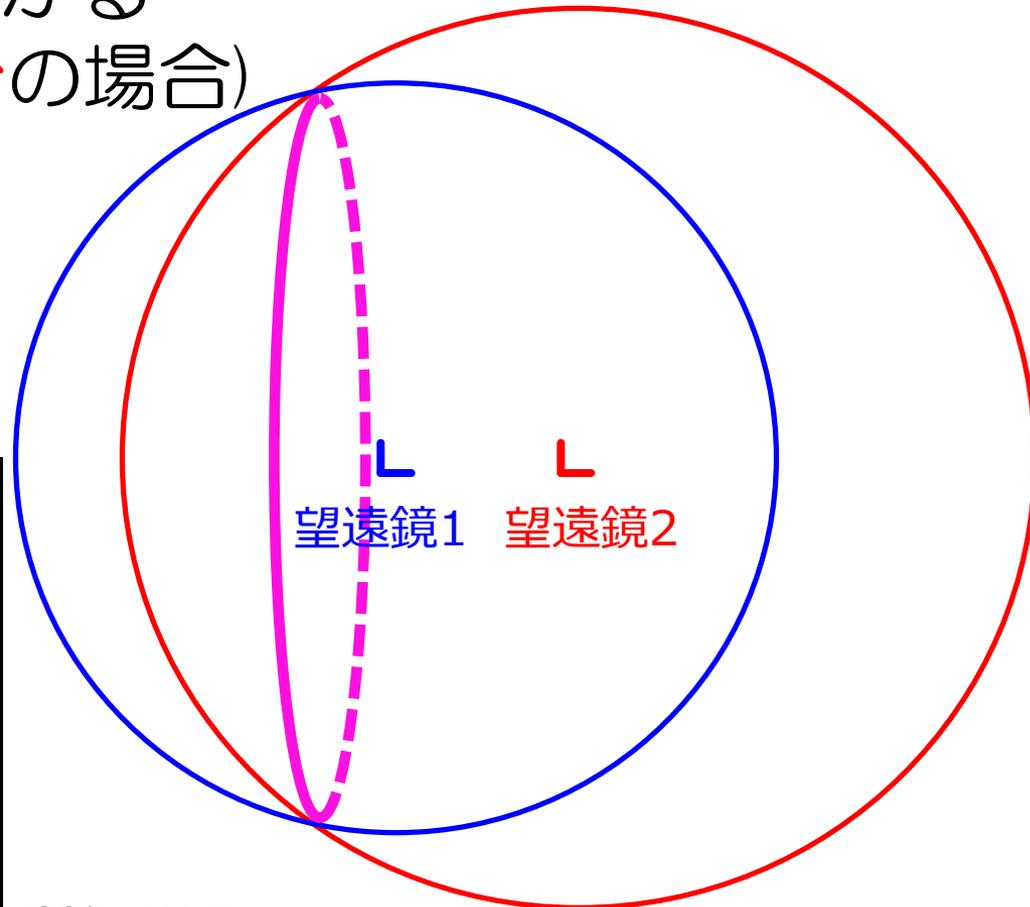


到達時刻にわずかな差が生じる

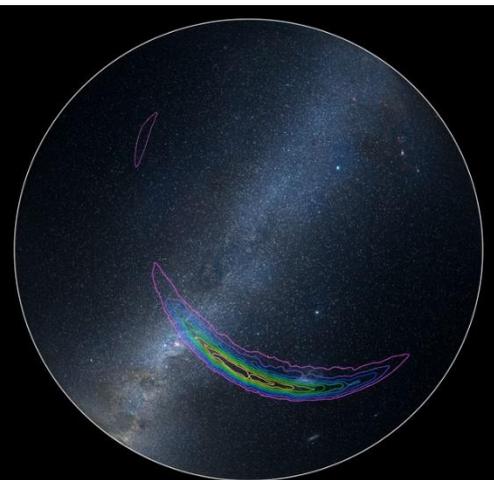
波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

円周上のどこからか
あることはわかる
(望遠鏡が**2台**の場合)



人間の耳
と同じ

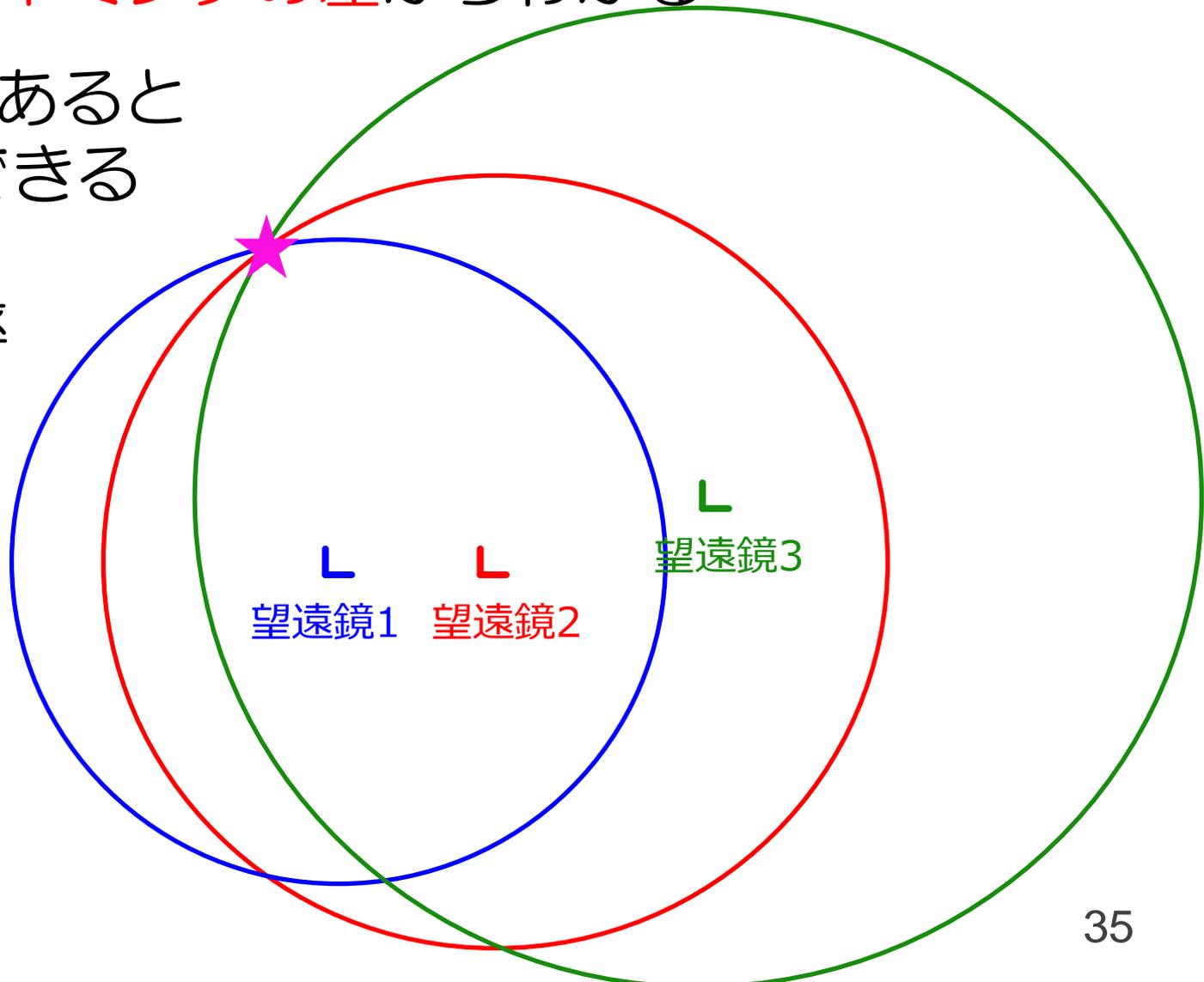


波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

望遠鏡が**3台**あると
完全に特定できる

精度や稼働率
を考えると
さらに4台、
5台、と
複数台必要



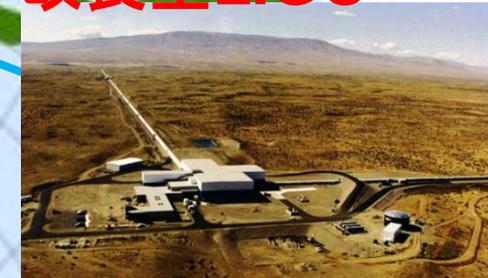
世界の重力波観測ネットワーク

- 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



GEO-HF
(稼働中)



改良型Virgo
(建設中)



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
- 日本を中心に国内外60以上の大学・研究機関、200人以上の研究者
- **地下建設と低温が大きな特徴**



プロジェクト代表:
梶田隆章



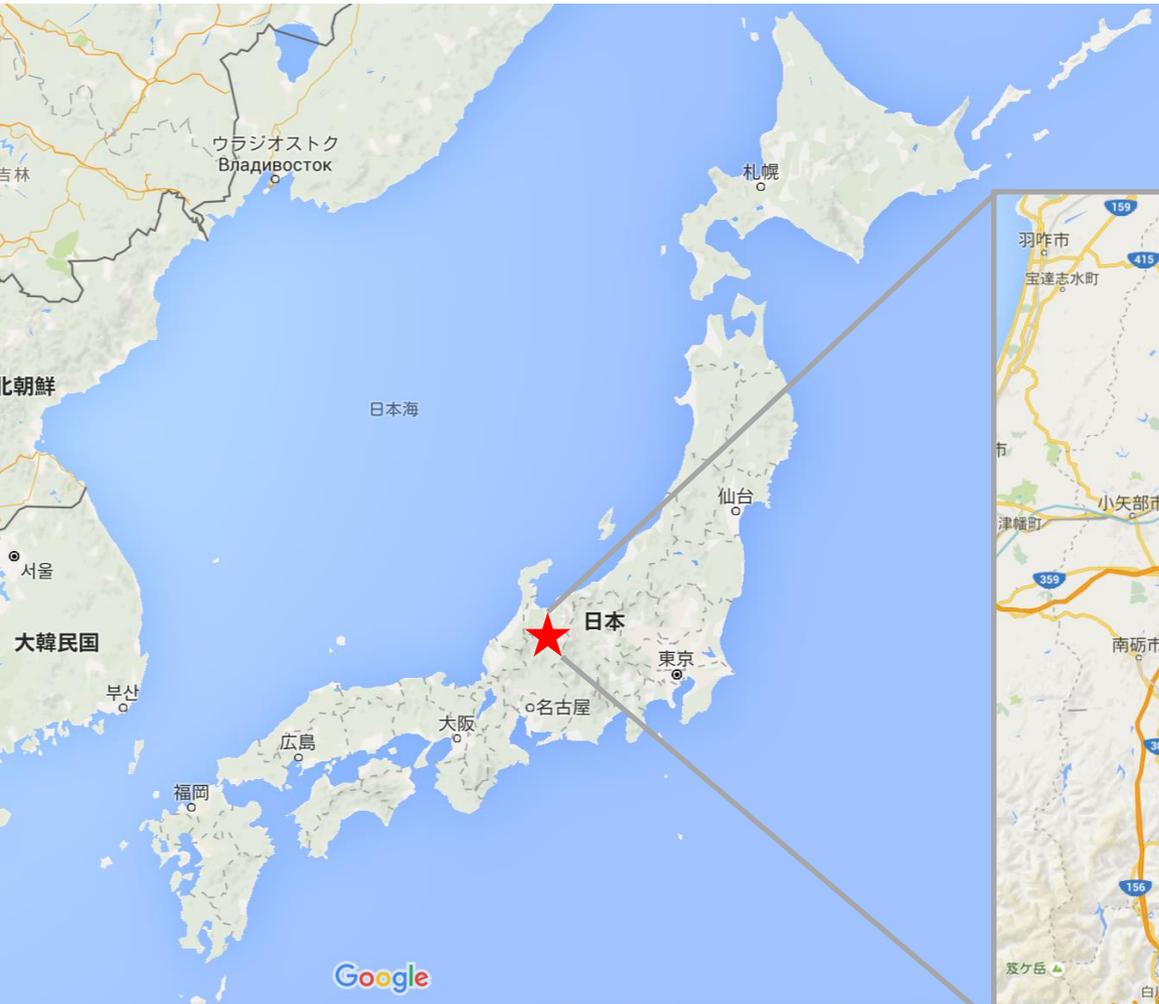
などなど

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

神岡の風景



重力波オフィスの近く(茂住)

2015年6月



2016年2月



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)

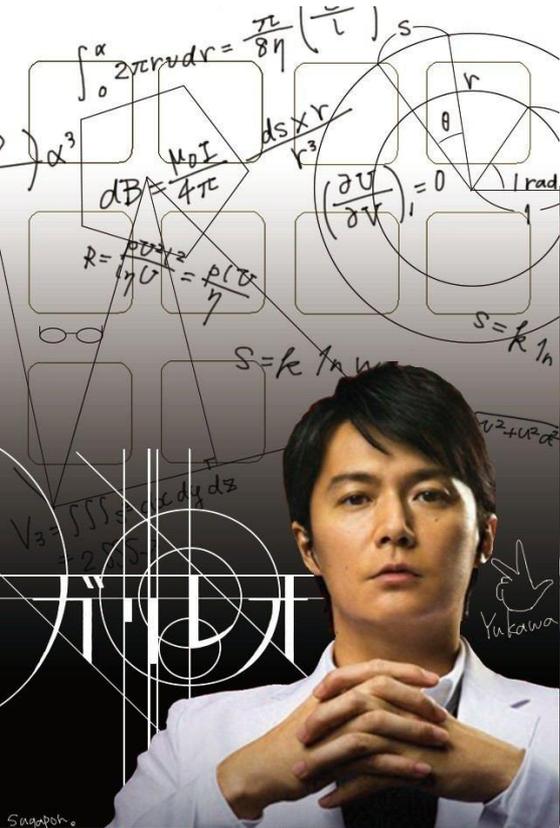
地下での作業

- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



地下での作業

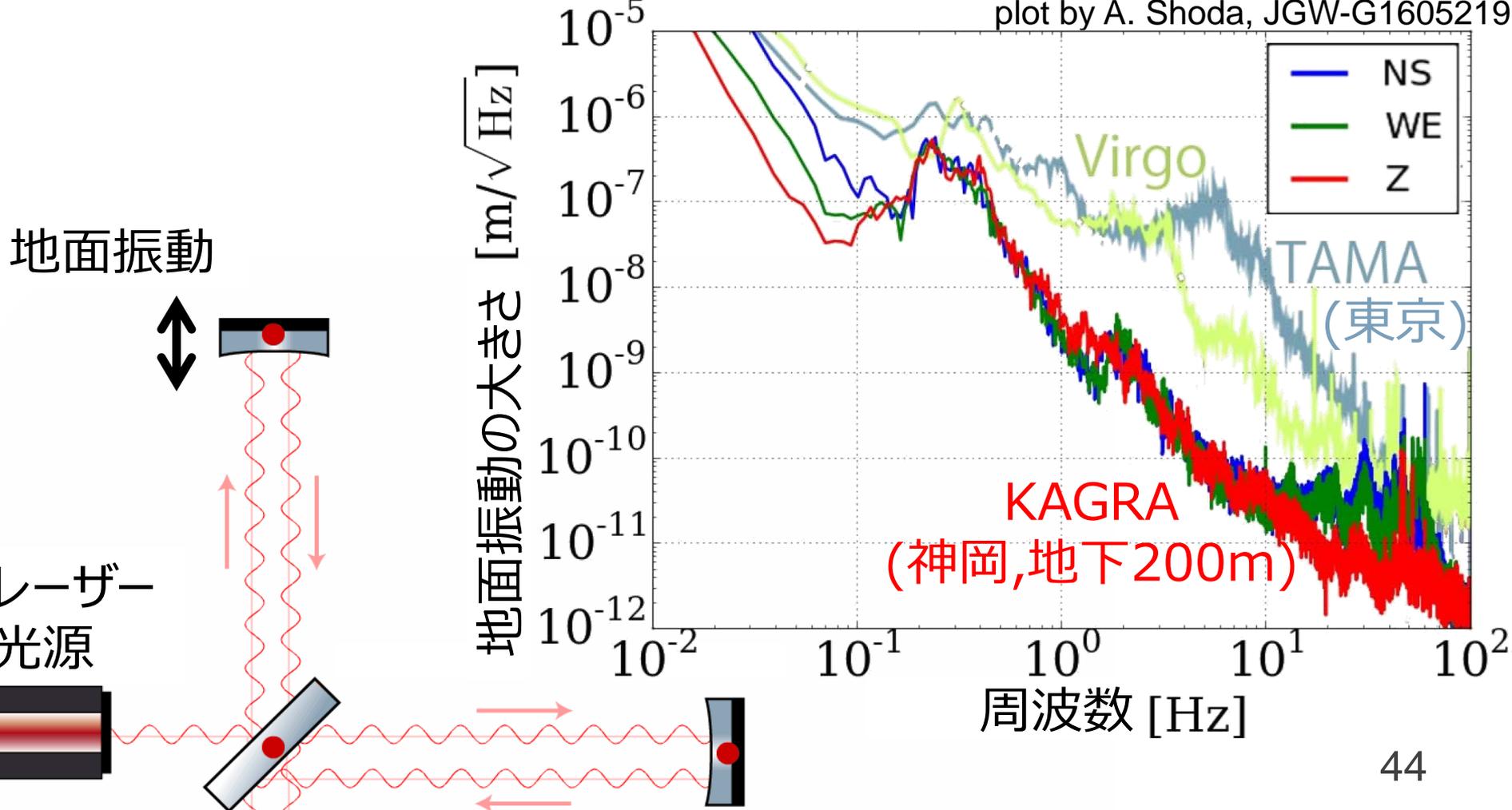
- 思ったのと違う！



なぜ地下なののか？

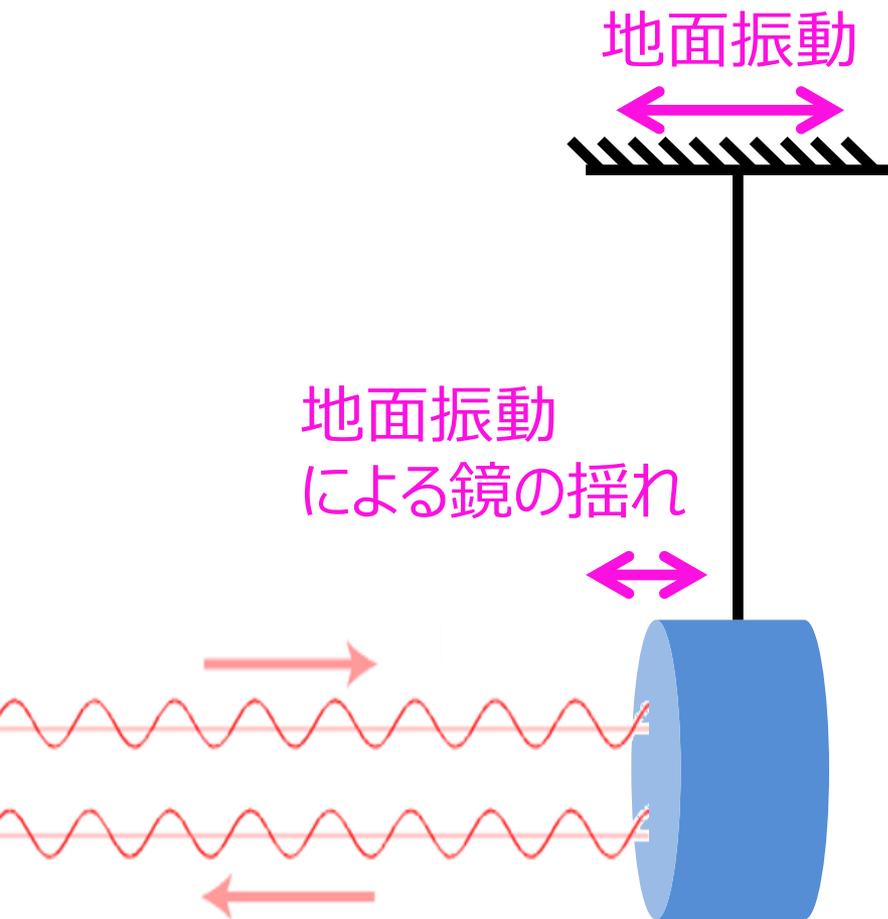
- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



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)



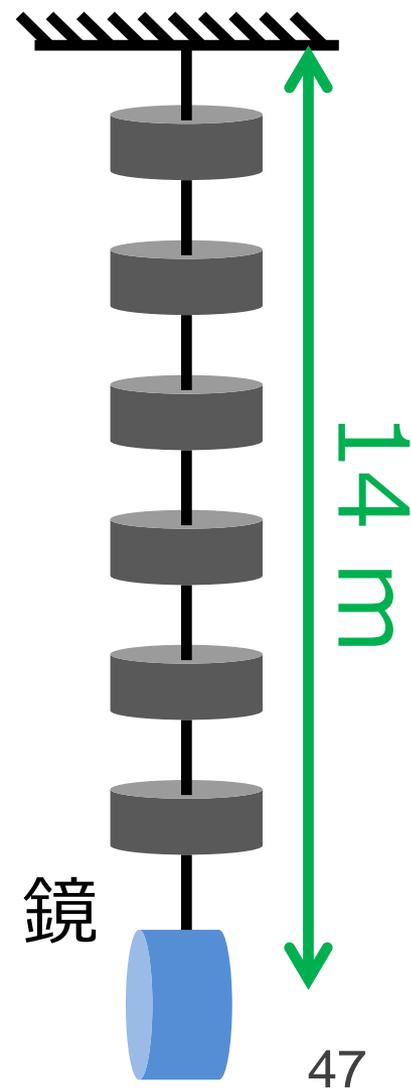
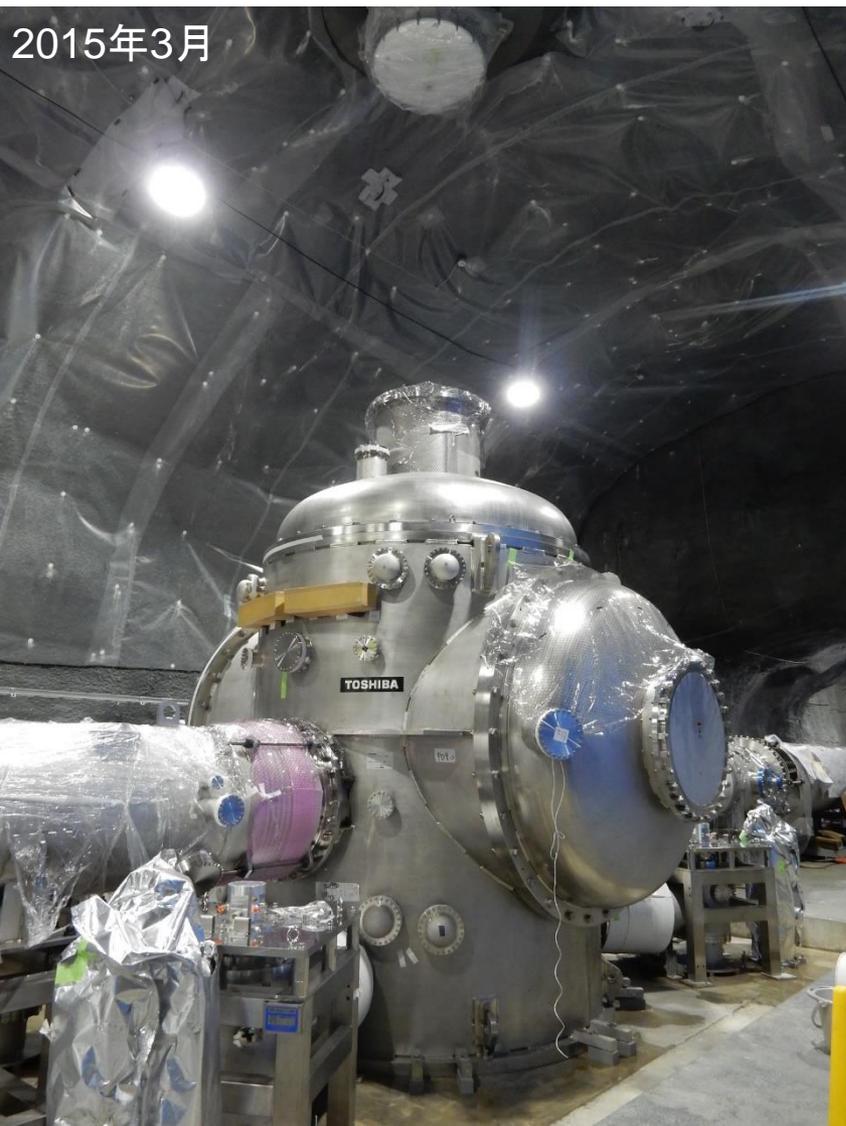
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)

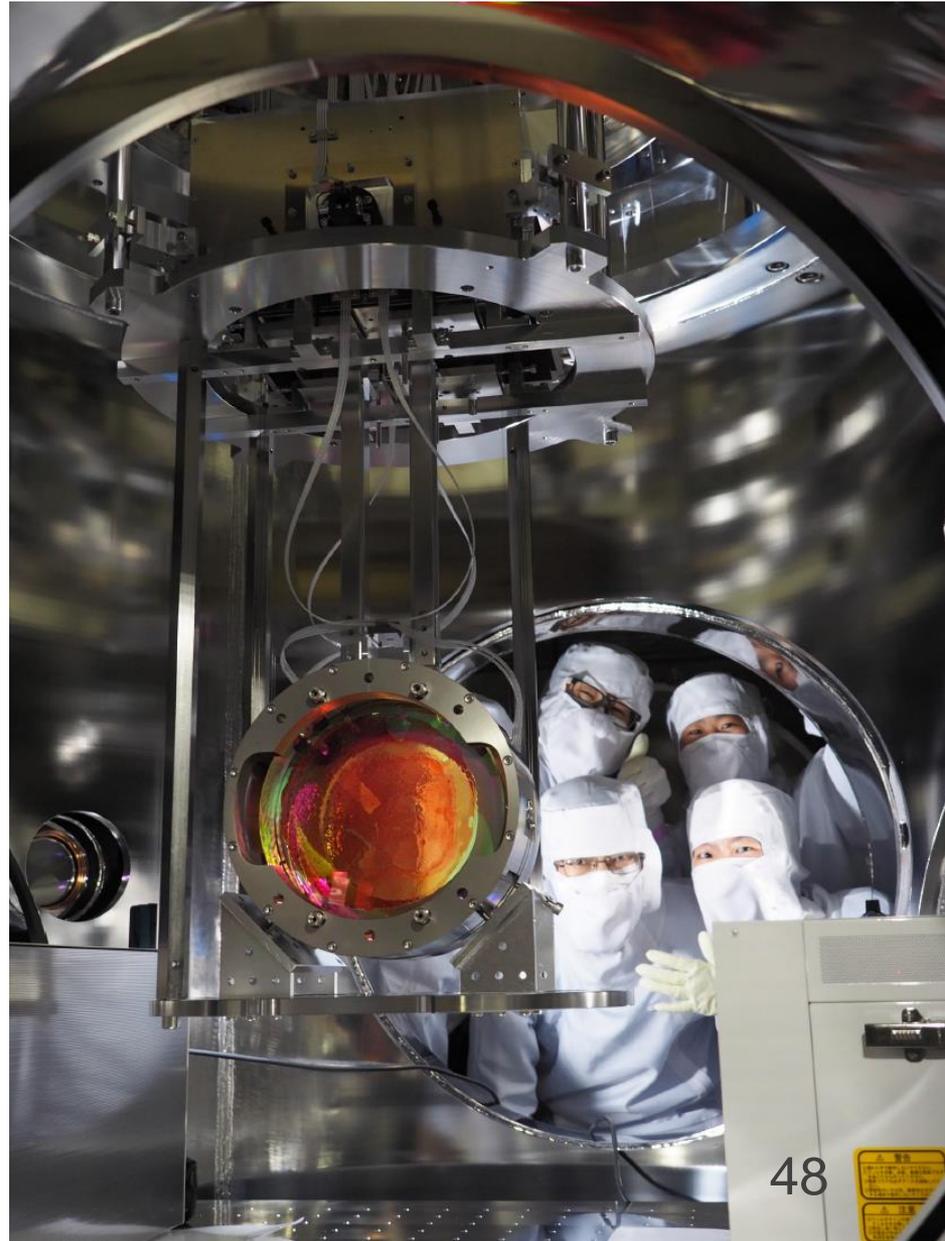
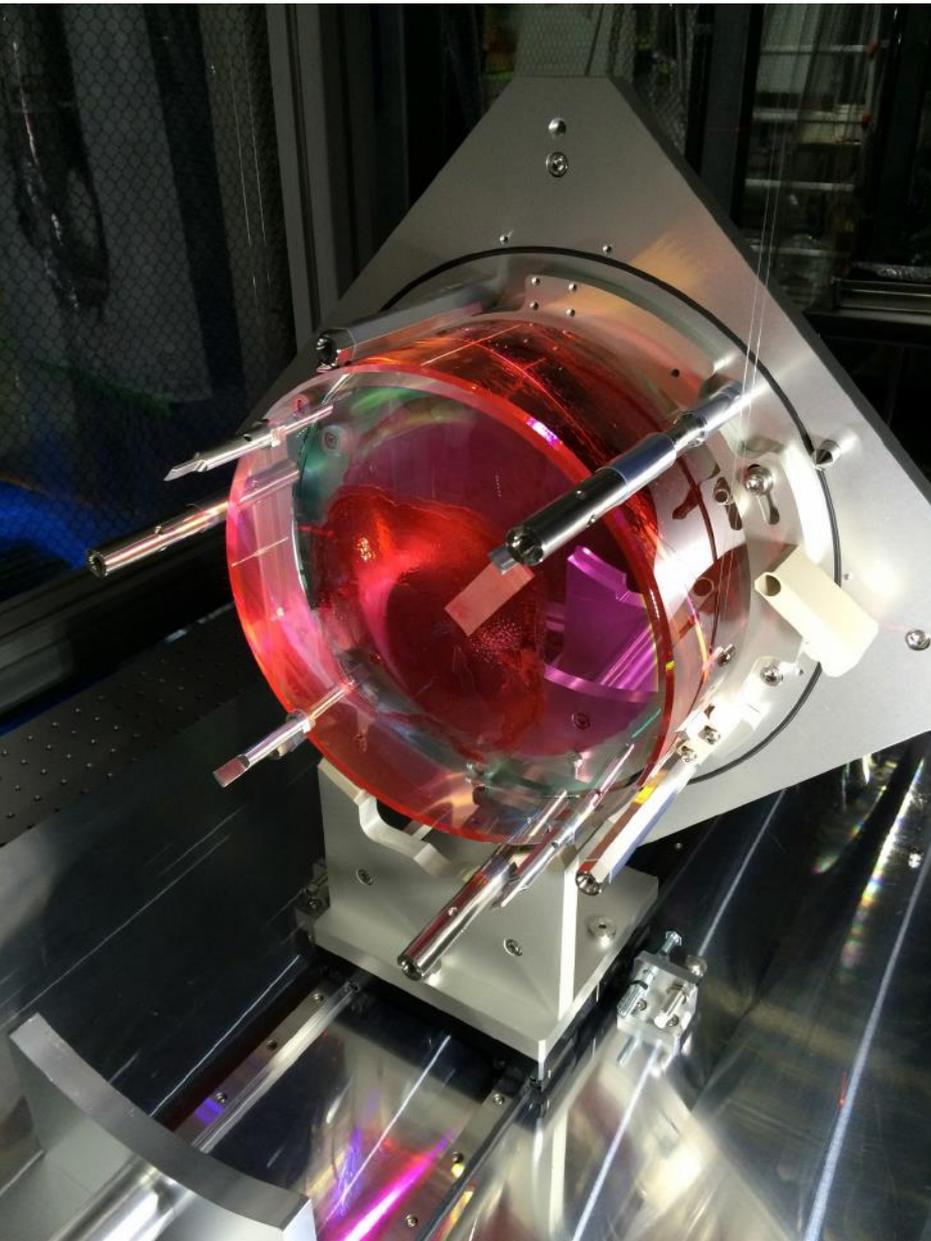


KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

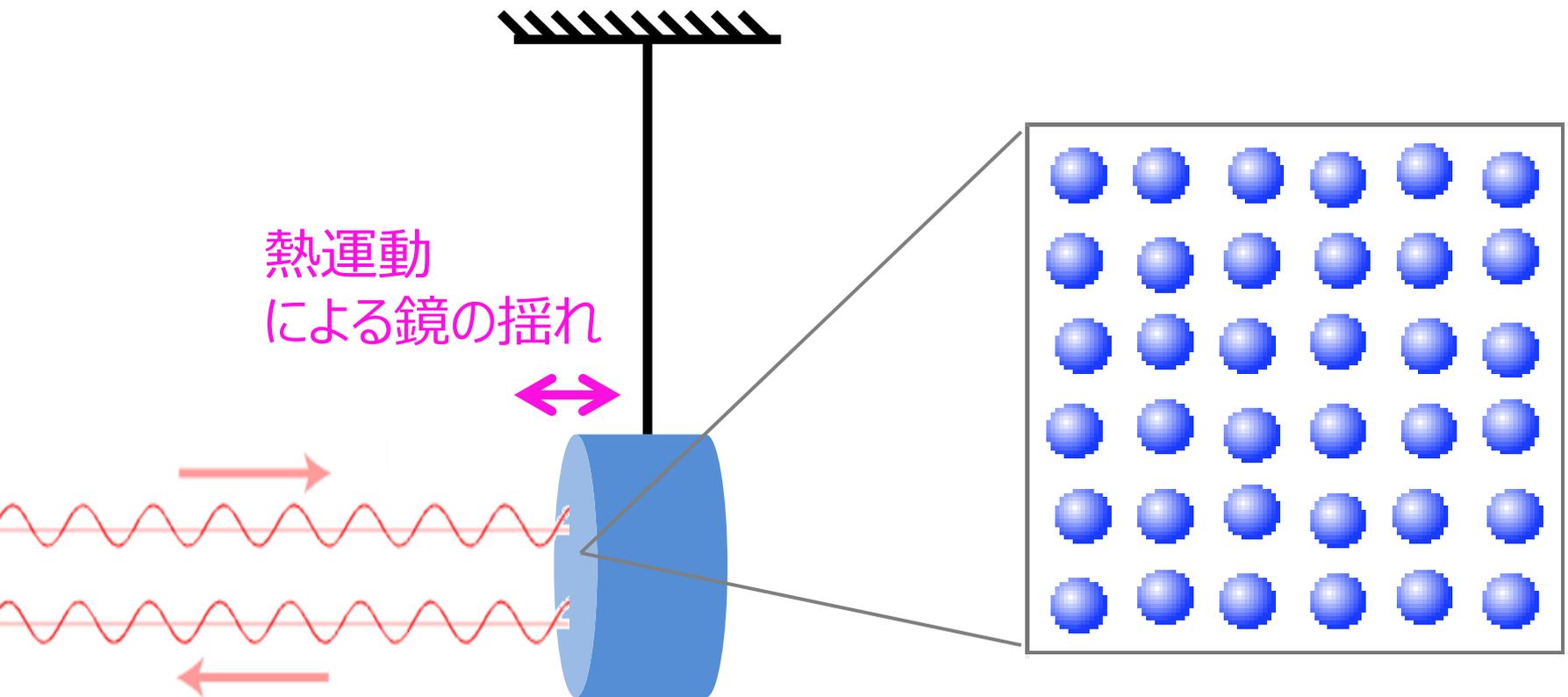


KAGRAの鏡の防振装置



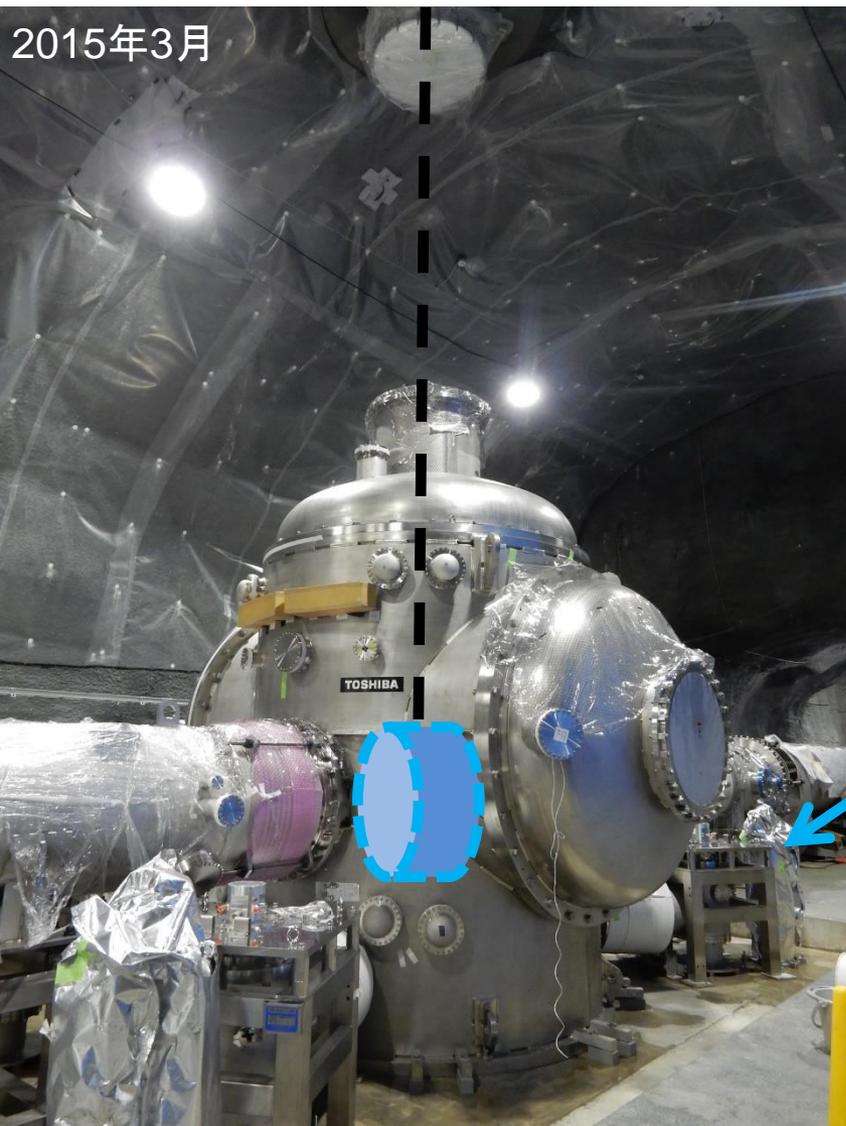
鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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

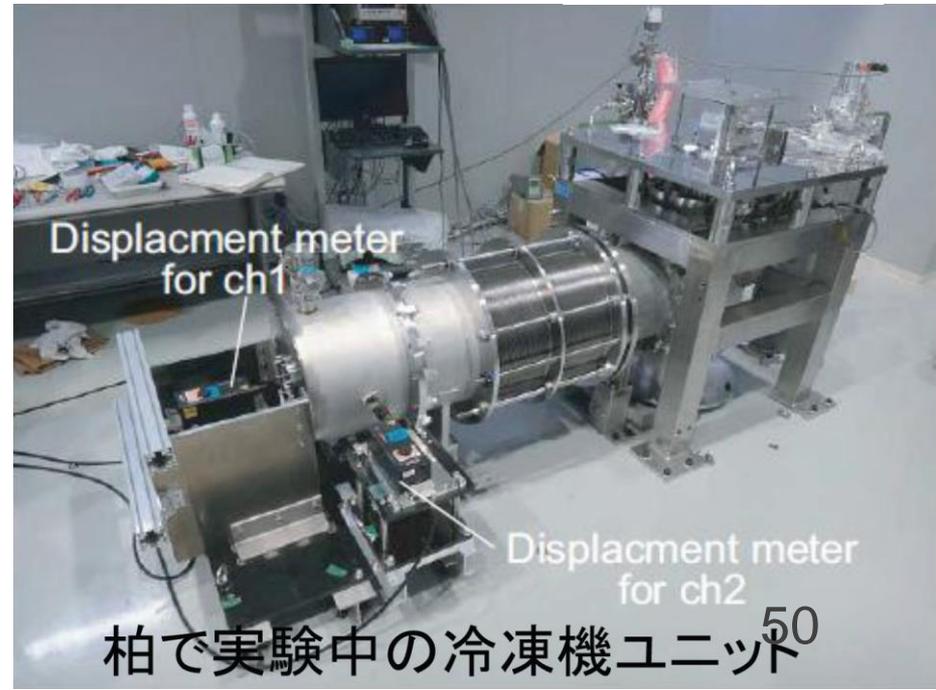


KAGRAの低温装置

- 最低振動の冷凍機を開発

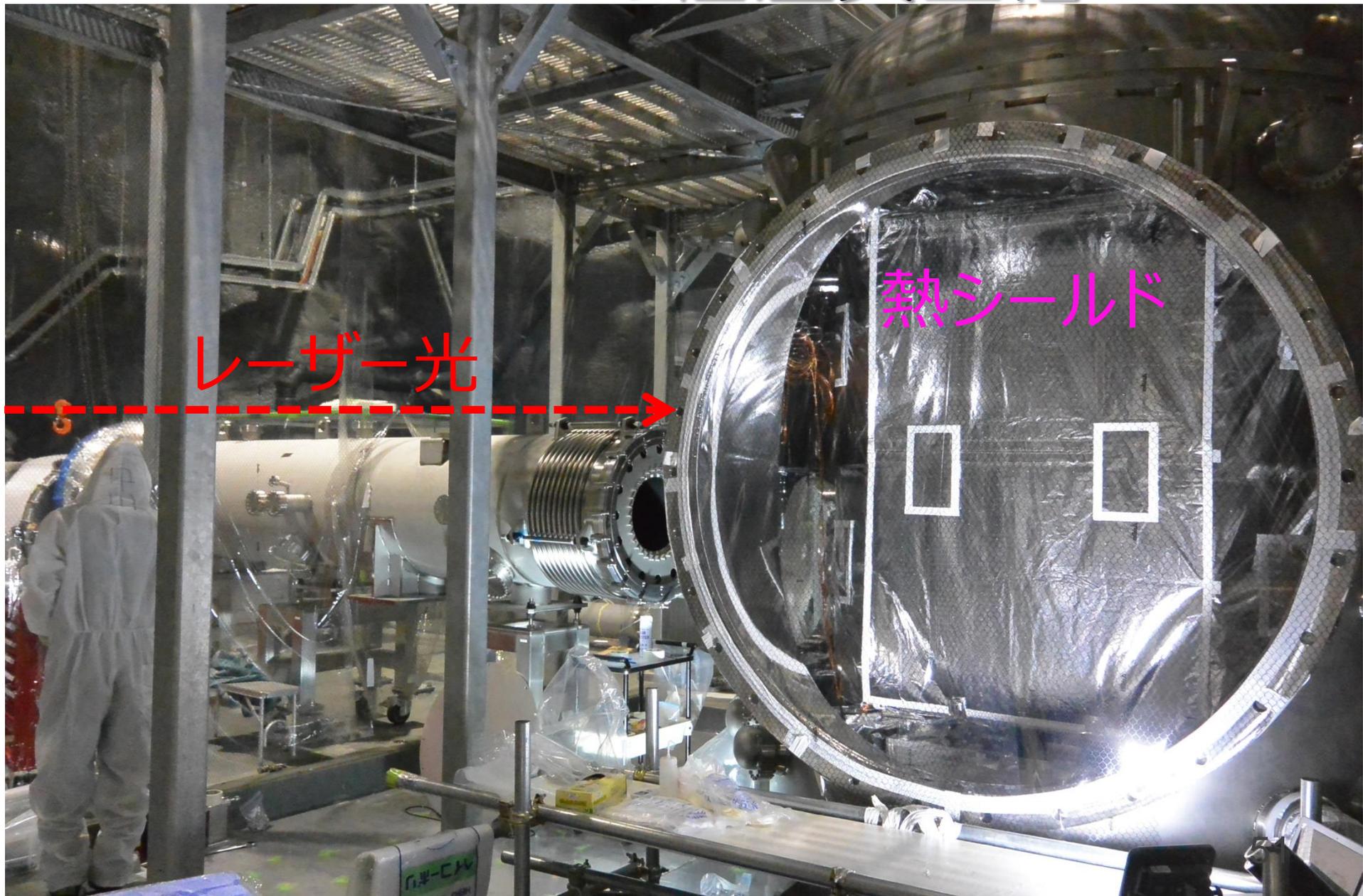


冷凍機



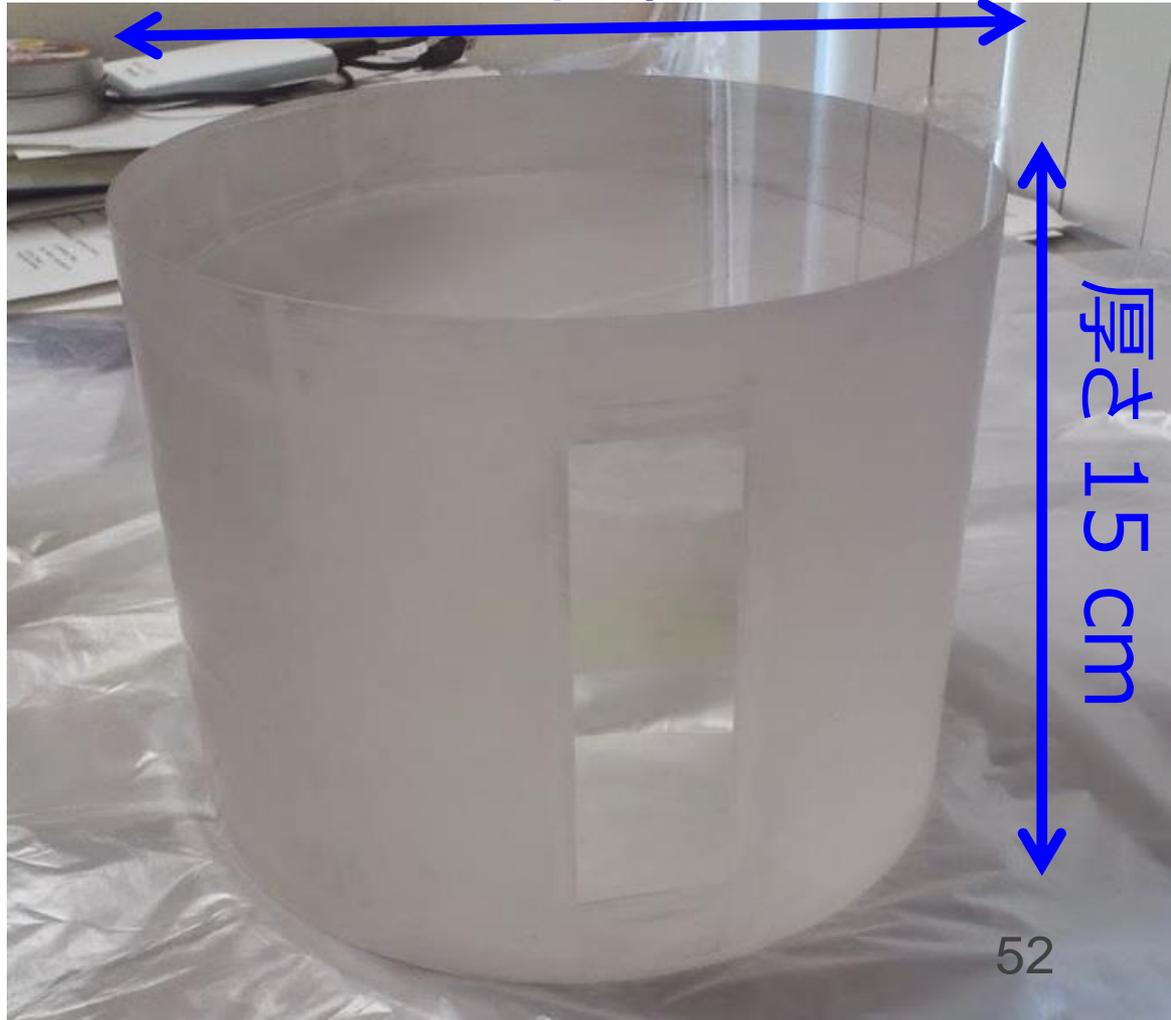
柏で実験中の冷凍機ユニット⁵⁰

KAGRAの低温真空槽



KAGRAの鏡

- 人工サファイア
- 冷やした時の性能が優れている 直径 22 cm
- 超高反射率
(99.99 %以上)
- 超低損失
- ものすごく
なめらか



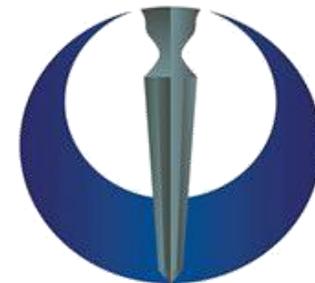
KAGRAのクリーン環境

- 鏡にほこり一つ付けない
スーパークリーンブース



KAGRAのクリーン環境

- 鏡にほこり一つ付けない
スーパークリーンブース



内閣総理大臣表彰

ものづくり日本大賞



第6回ものづくり日本大賞
内閣総理大臣賞 受賞

ありがとうございました

中小・中堅企業から東大宇宙線研究所まで、**KOACH**は活躍しています

企業との協力関係

- KAGRAは最先端技術に支えられている

100年をつくる会社
鹿島



トンネル掘削
(国内最速)

クリーン、ヘルス、セーフティで社会に
興研株式会社



クリーン環境



KAGRA

超高真空装置



TOSHIBA
Leading Innovation >>>

極低温技術



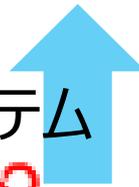
JECC TORISHA Co.,Ltd.

低振動
冷凍機



住友重機械

計算機システム



FUJITSU

……などなど

MPC 真空機器設計製造
株式会社 **ミラプロ**



地元との協力関係



神岡の重力波オフィス
(元々は保育園)



飛騨市の倉庫

サイエンスカフェ
岐阜新聞



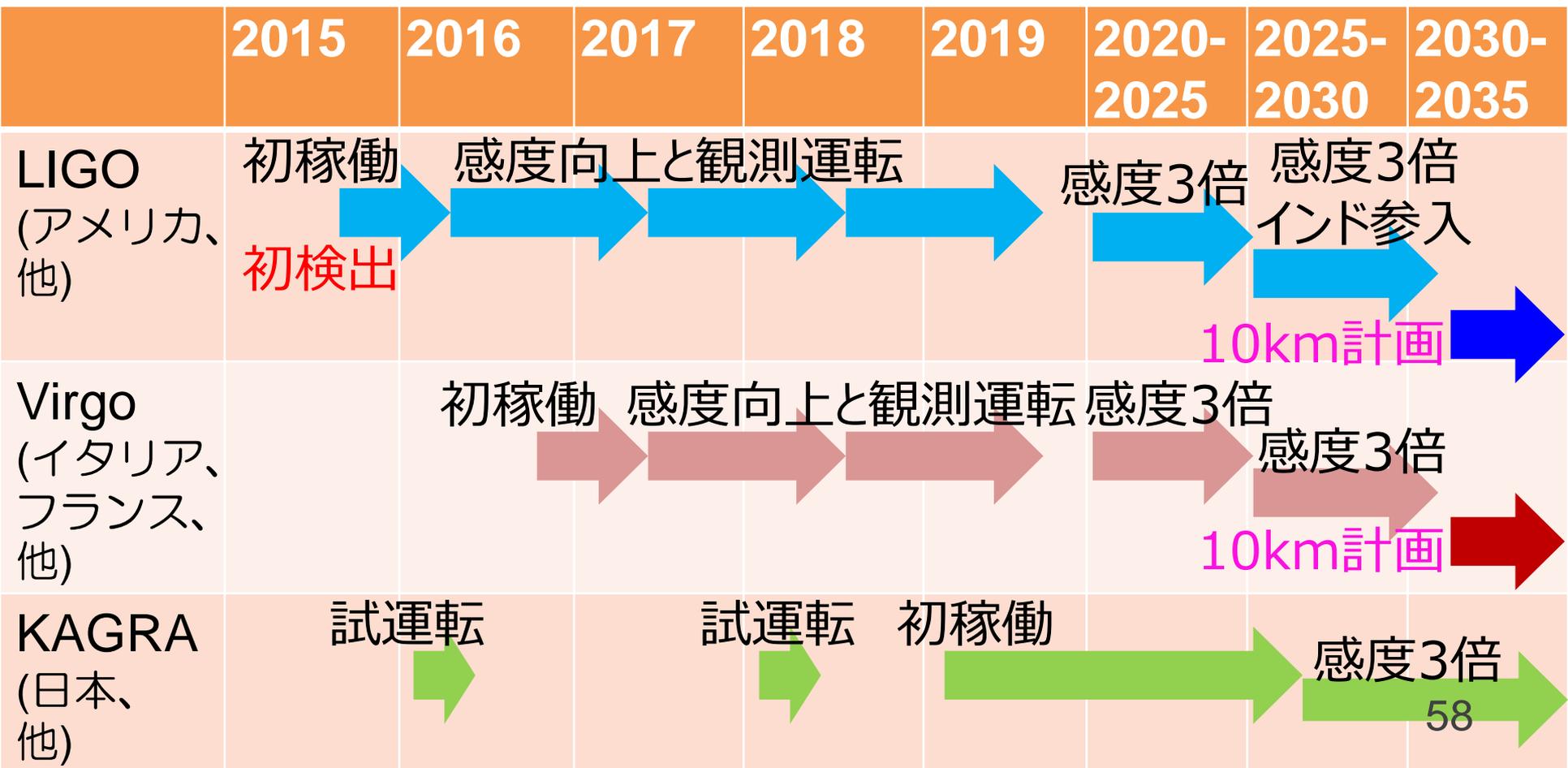
KAGRAの現在の状況

- 2016年3-4月に単純な構成での常温試験運転
- 2018年3月の低温試験運転に向けて装置開発中
- 本格観測運転は2019年見込み



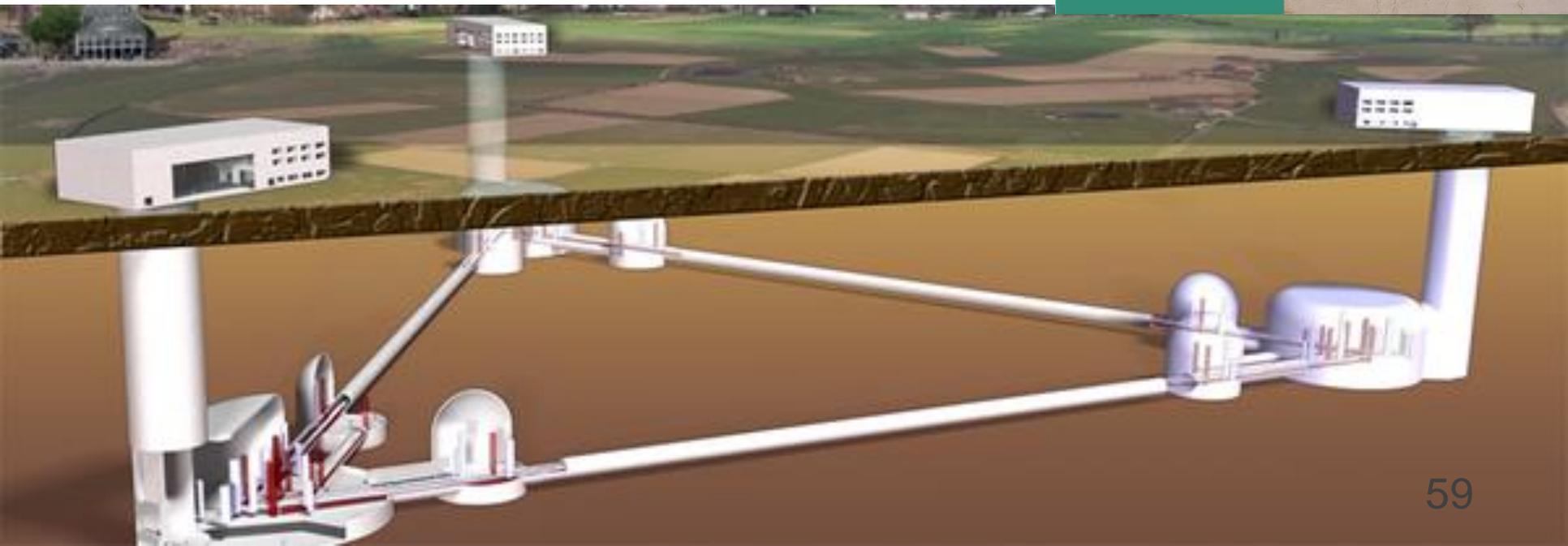
各国の将来計画

中性子星連星 超新星爆発
からの重力波？ からの重力波？
さらなる 連星の 連星の形成
ブラックホール連星の発見？ 波源特定？ メカニズム解明？



KAGRAと将来の10km計画

- 将来の10km計画
 アインシュタイン望遠鏡計画 (ヨーロッパ)
 地下建設と低温
- KAGRAは将来計画の技術を
 先取りしている



KAGRAに与えられた予算は？

A. 150億円

B. 1500億円

C. 15兆円

- ちなみに.....

新国立競技場: 約1490億円

リニア中央新幹線: 5兆円 (トンネル246 km)

<http://www.jpnsport.go.jp/newstadium/>

<http://www.linear-chuo-shinkansen-cpf.gr.jp/>



東京大学基金

http://utf.u-tokyo.ac.jp/

東京大学への寄付の情報、受付、活動報告

東京大学基金
The University of Tokyo Foundation

明日の日本を支えるために

Google™ カスタム検索



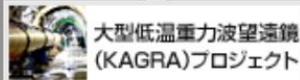
English

いま貢献していただけること [プロジェクトをさがす](#)

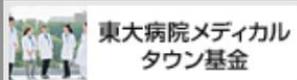
大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクト

アインシュタインからの最後の宿題に挑戦
宇宙をとらえる新しい目「KAGRA」

[詳しく知る](#)



大型低温重力波望遠鏡
(KAGRA)プロジェクト



東大病院メディカル
タウン基金



新図書館計画
アカデミック
コモンズ



外国人留学生
支援基金



東大スポーツ
振興基金

寄付をする
Donate

[教職員の方の寄付](#) [団体の方の寄付](#)

卒業生の方の寄付

個人の方の寄付

法人の方の寄付

遺産の寄付

寄付のお願い

[パンフレット PDF](#)



寄付をする

寄付のしかた

寄付の特典

トピックス
Topics

まとめ

- 予言から100年経ち、2015年に**重力波初検出**
- 重力波とは時空の歪みが光速で伝わる波
- レーザー干渉計で検出できる
- **ブラックホール連星合体**からの重力波を初検出
- **30太陽質量**ものブラックホールの存在が明らかに
ブラックホールはどのようにできるのか？
- 到来方向はまだあまり特定できていない
3台以上の同時観測、**国際観測ネットワーク**必要
- 岐阜県神岡地下に大型低温重力波望遠鏡**KAGRA**
地下建設と**低温**で雑音を下げる最先端の工夫
2019年に本格運転開始予定
- 重力波天文学ははじまったばかり

参考文献



ご協力いただいた皆様

- 神田展行 (大阪市立大学)
- 川村静児 (東京大学宇宙線研究所)
- 苔山圭以子 (東京大学宇宙線研究所)
- 衣川智弥 (東京大学宇宙線研究所)
- 阿久津智忠 (国立天文台)
- 鈴木敏一 (高エネルギー加速器研究機構)
- 小森健太郎 (東京大学)
- 桑原祐也 (東京大学)
- その他200人超のKAGRAコラボレータのみなさま
- 神宮司英子様 (朝日カルチャーセンター)

などなど