

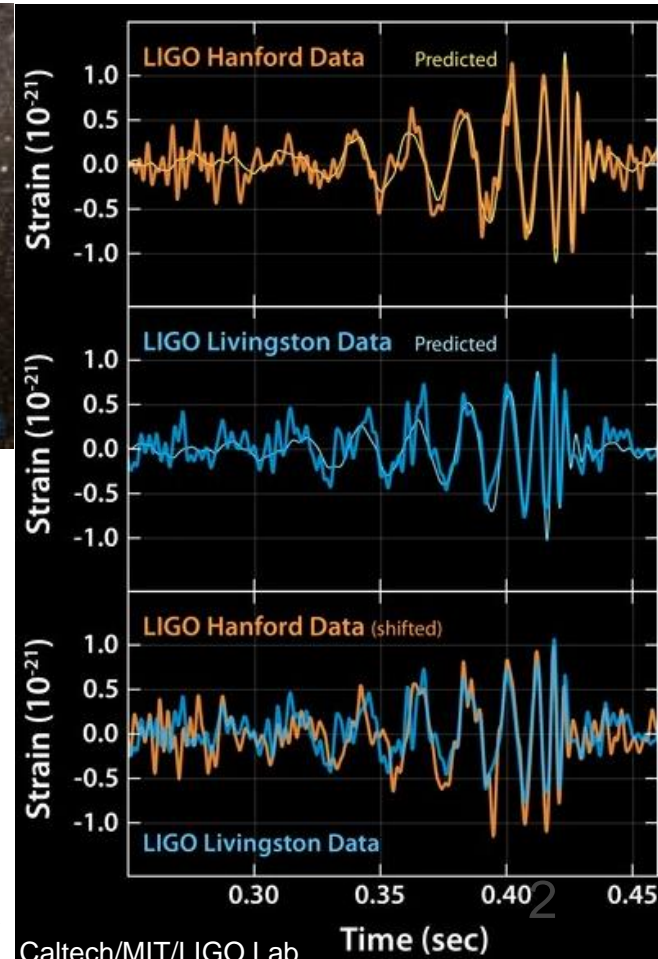
# 重力波望遠鏡KAGRAで聞く！ ブラックホール誕生の声

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**





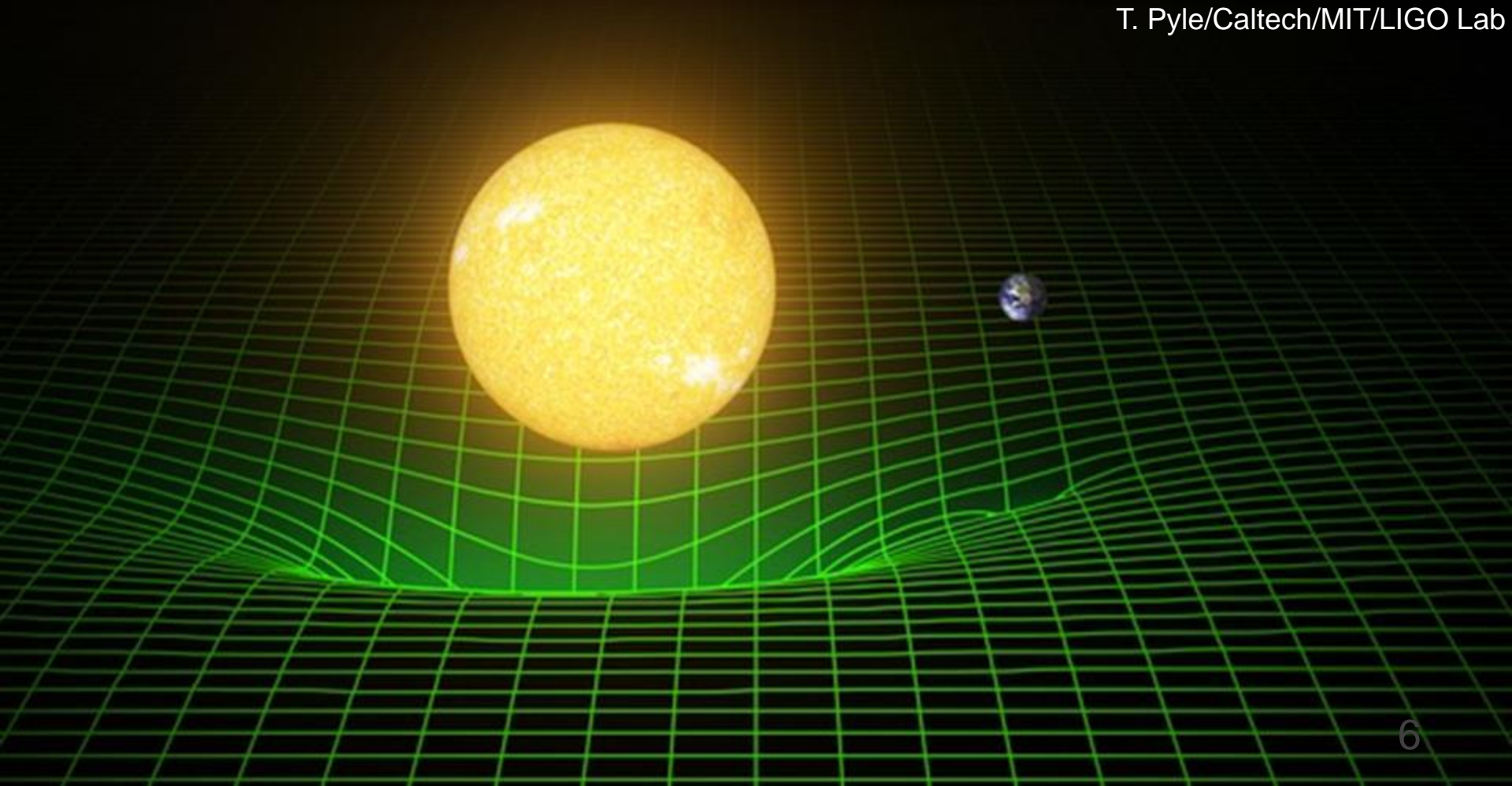
# 今回のお話

- **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

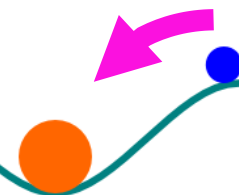
- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

なにもないトランポリンは平ら



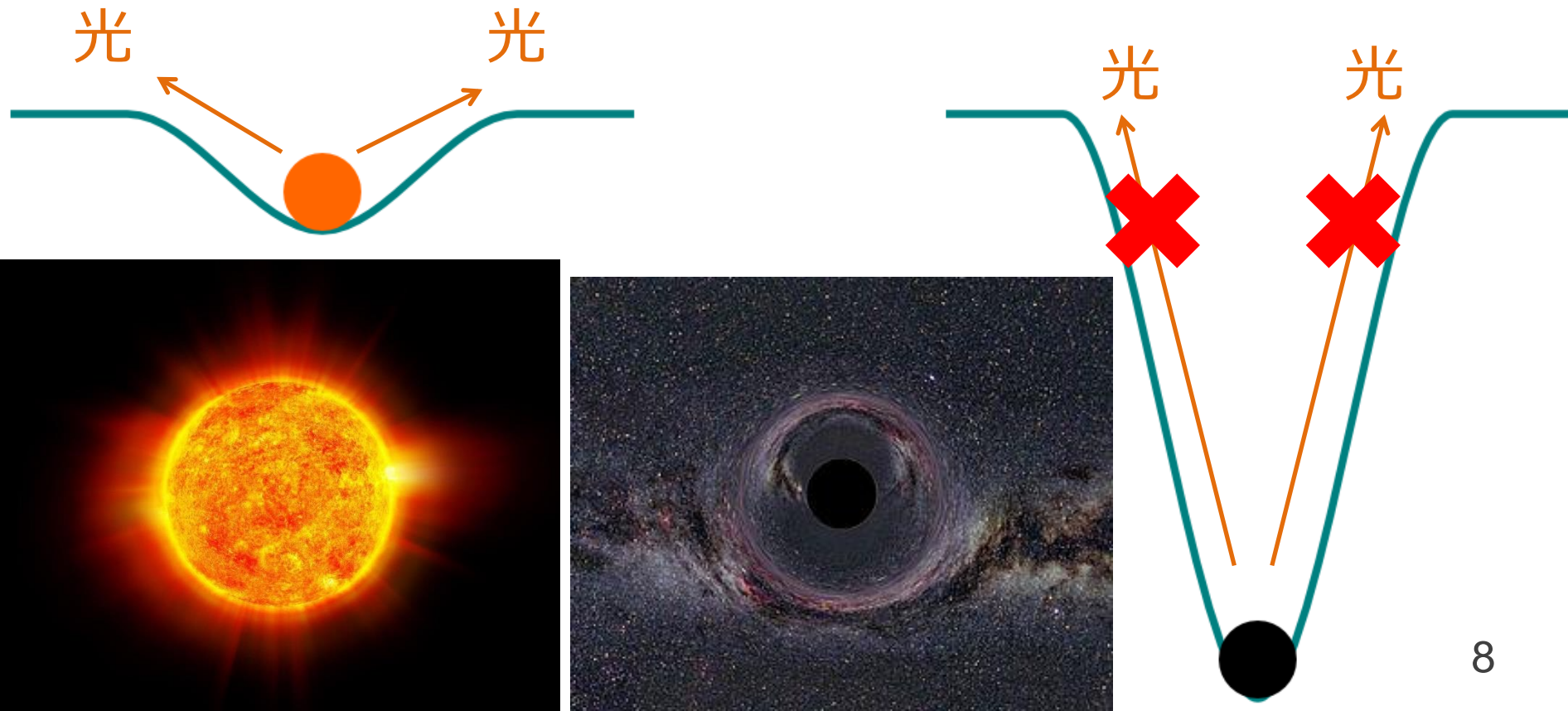
ボールを置くと  
トランポリンが歪む

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

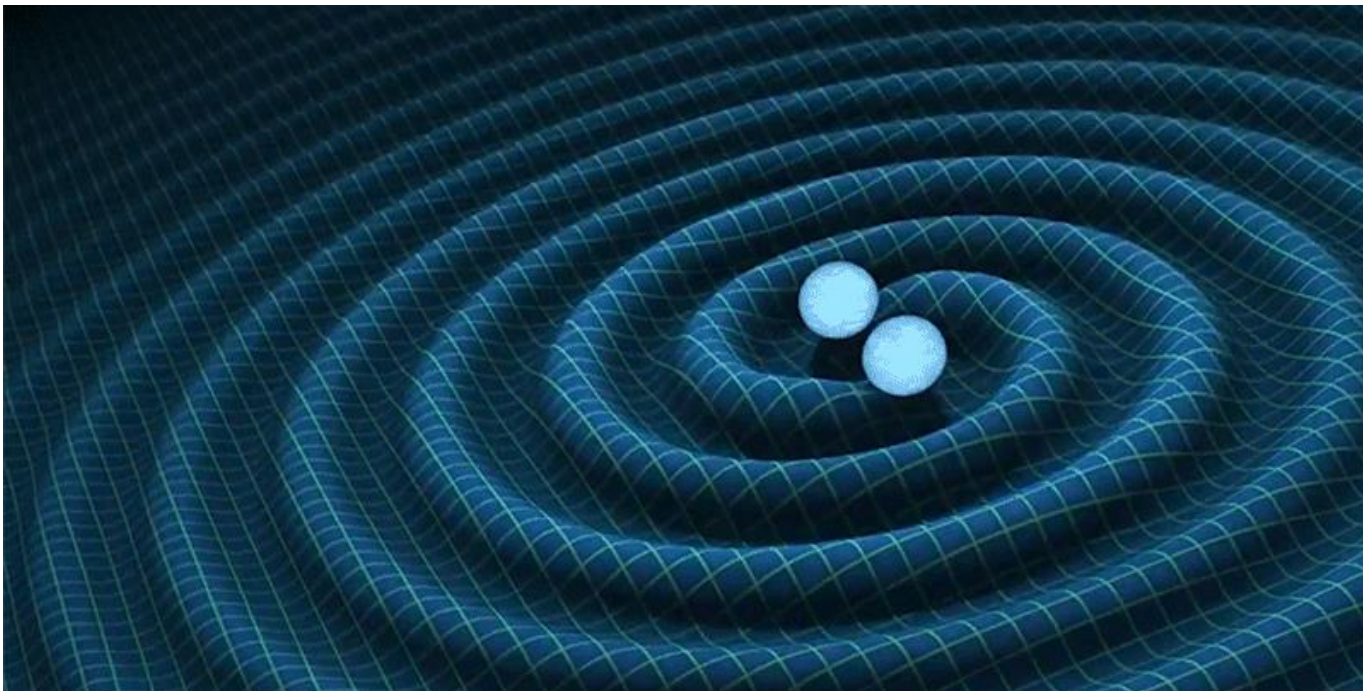
- 極端に小さく重い天体
- 空間が歪みすぎて光も何も脱出できない  
光で見ることができない天体





# 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」

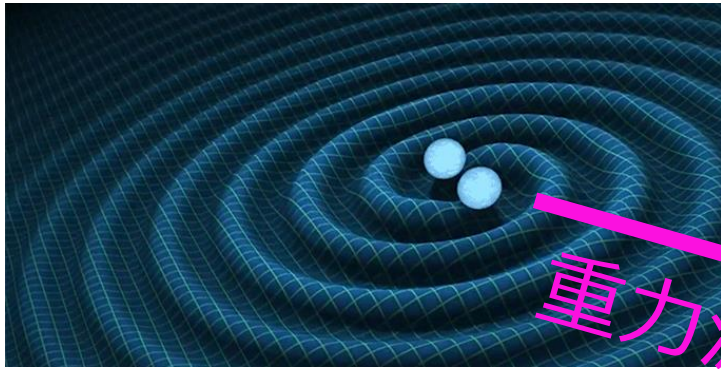
- 物体が動くと空間の歪みが変化し、光の速さで伝搬する → これが重力波



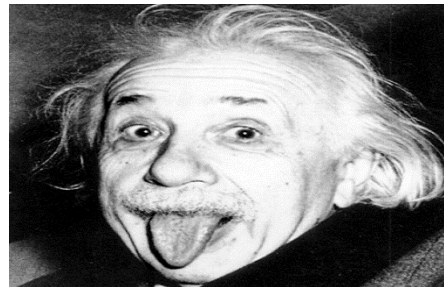
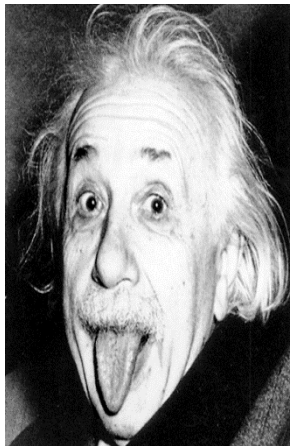
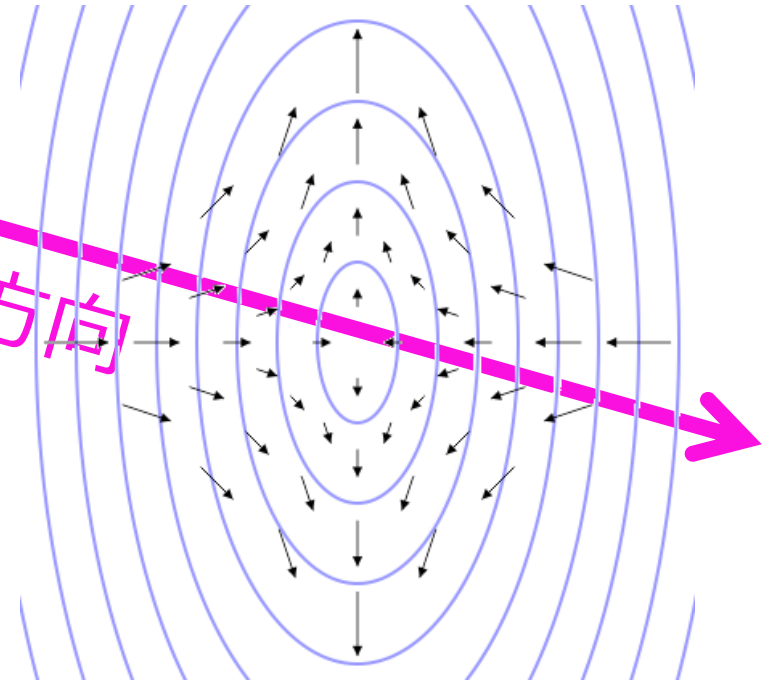
水の波紋  
に似ている

# 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)

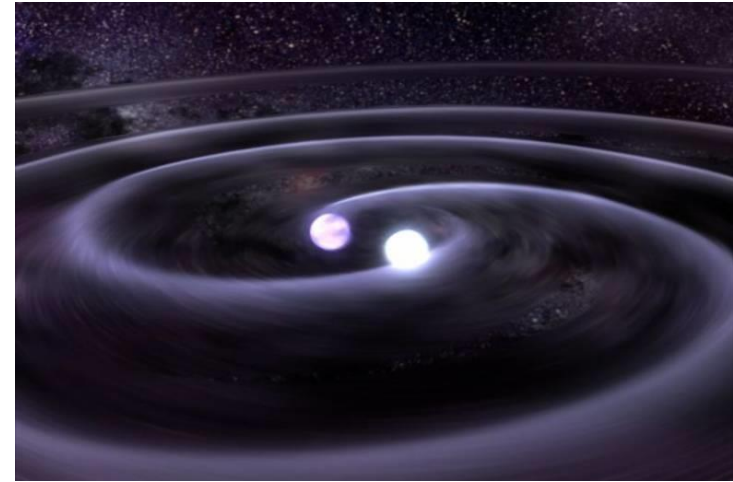


重力波の伝わる方向



# 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

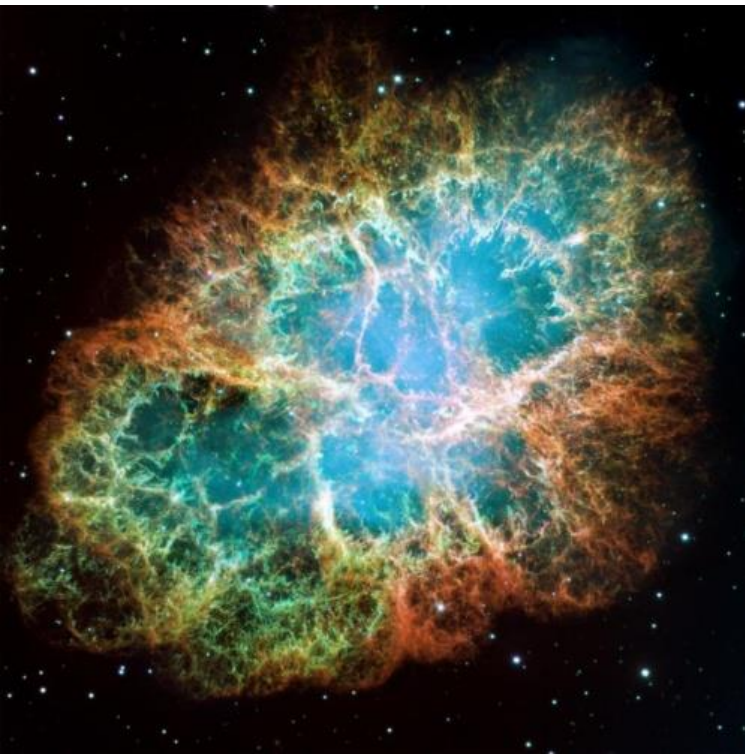


中性子星連星

ブラックホール連星



超新星爆発

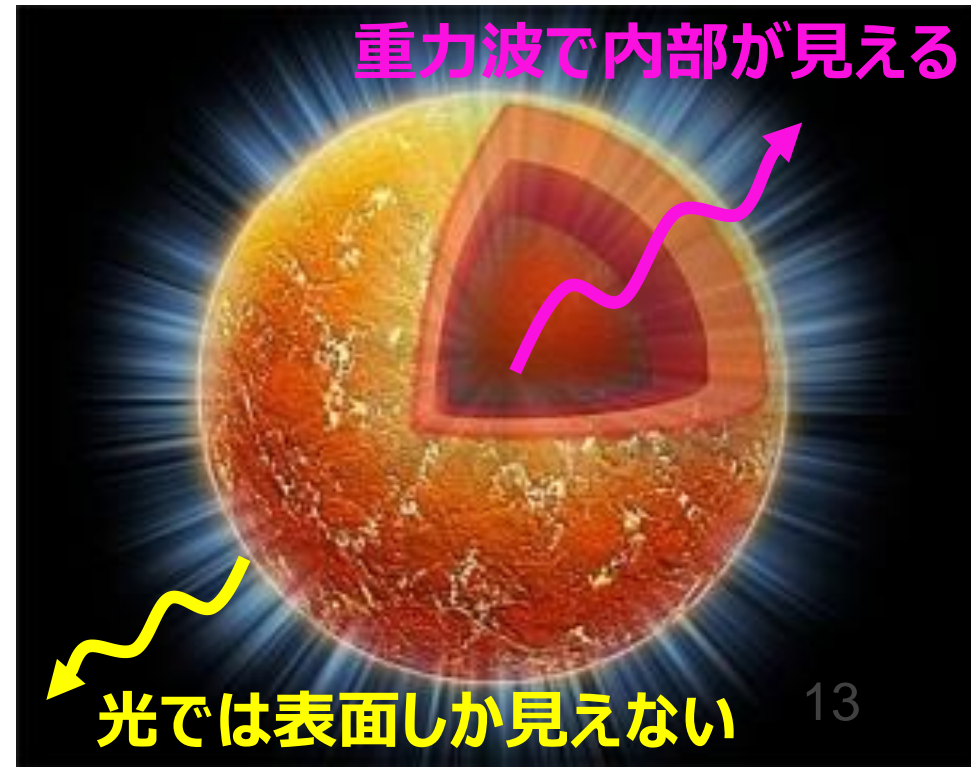




# 重力波で何がわかる？

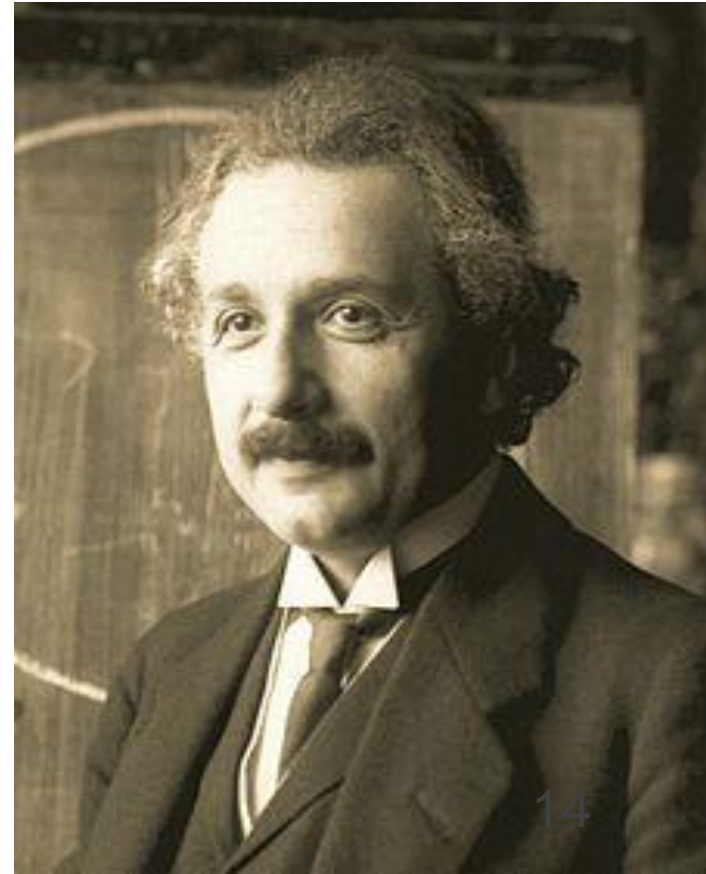
- **星の中**を探ることができる  
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる  
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

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

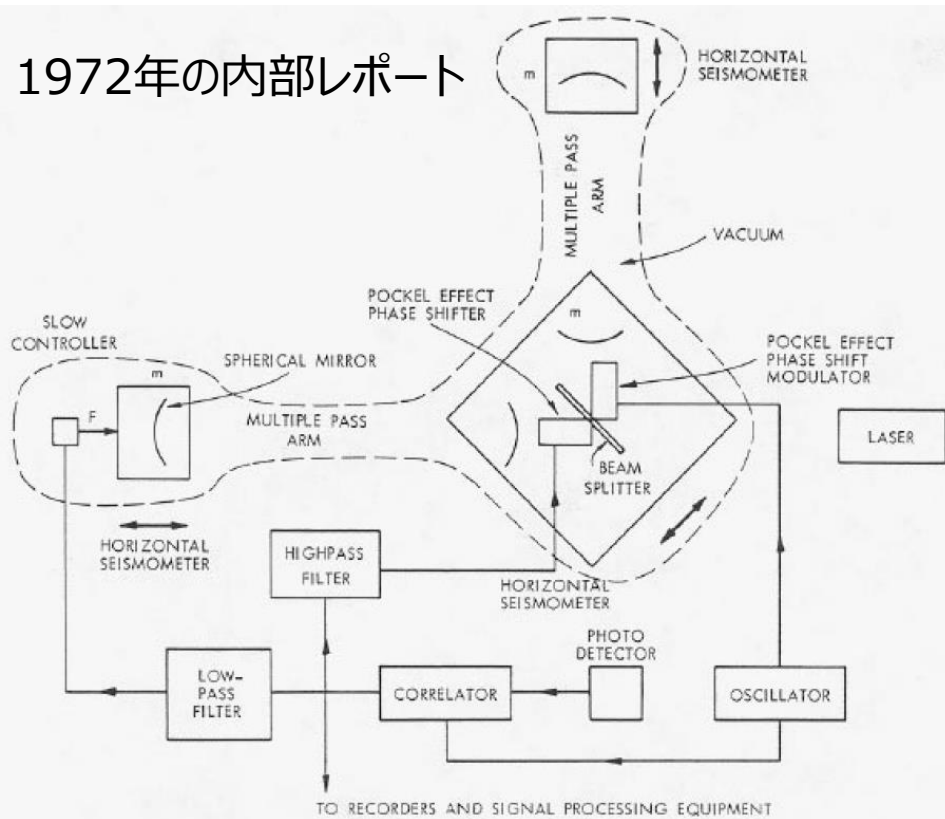
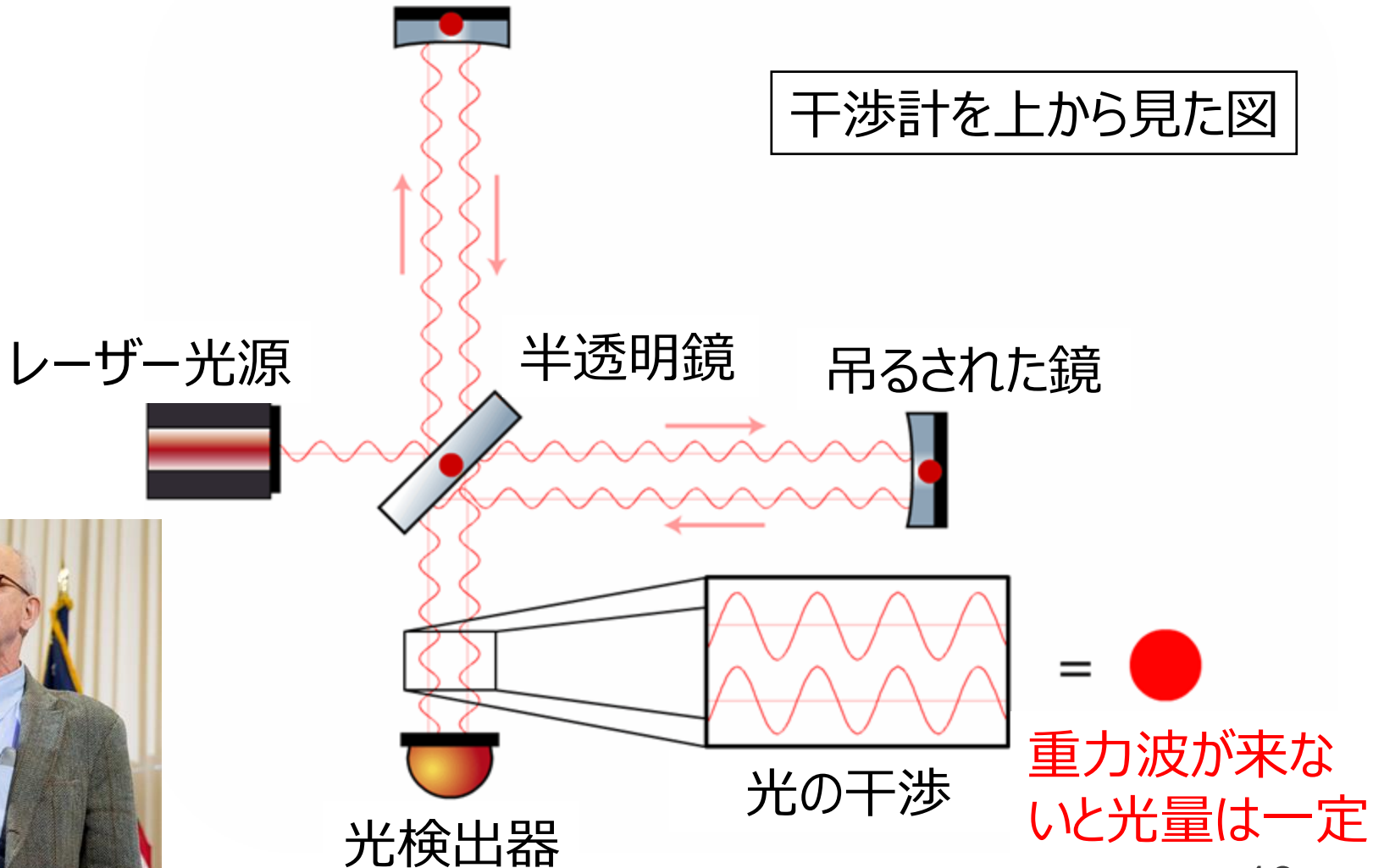


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



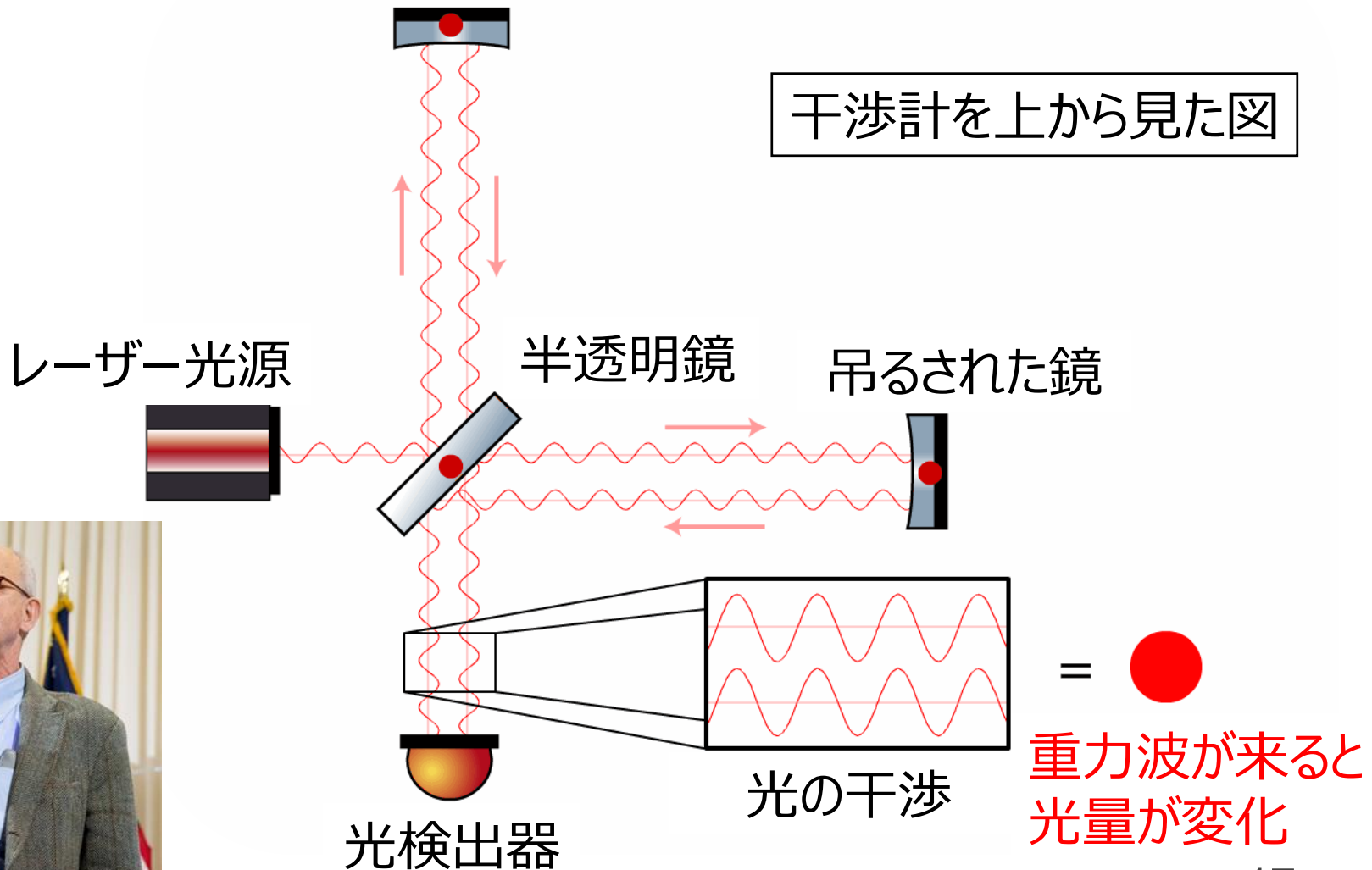
# レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 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

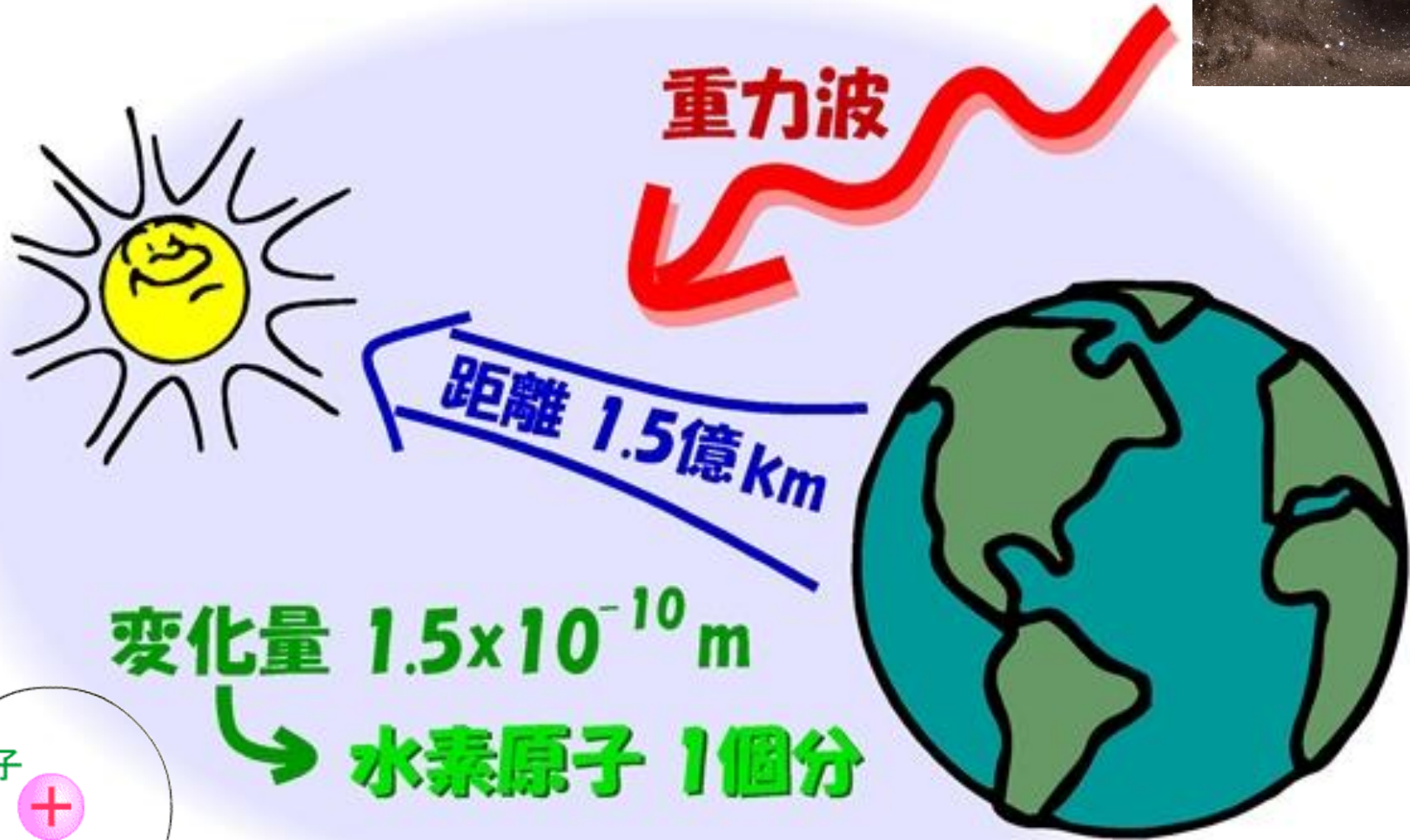
- 両腕の長さの差をレーザーで測定





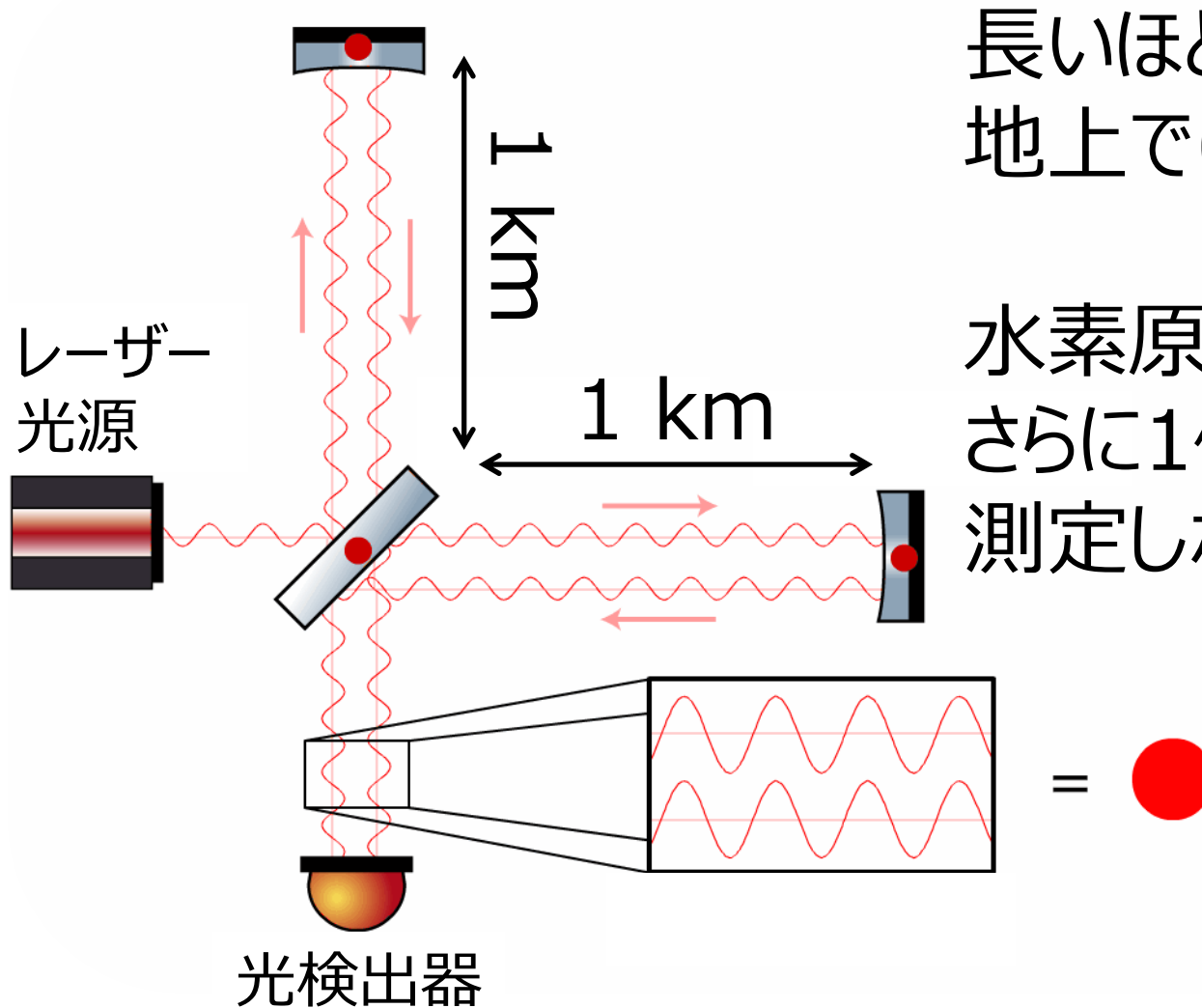
# 重力波の振幅はどれくらい？

- 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

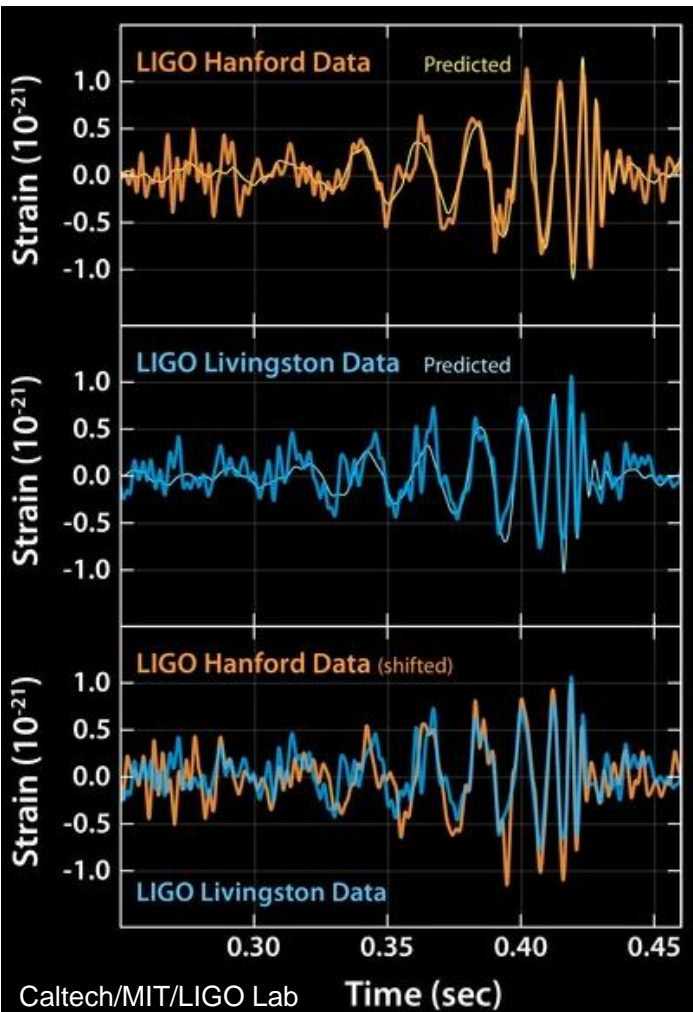
- 1916年 アインシュタインが重力波を**予言**
- 1960年代 ヴァイスが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始  
LIGO (アメリカ 4km)、TAMA300 (日本 300m)、  
GEO600 (ドイツ 600m)、Virgo (イタリア 3km)  
→ 重力波は**見つからず**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 改良型LIGOが初稼働
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表  
**予言から100年、  
提案から50年！**

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



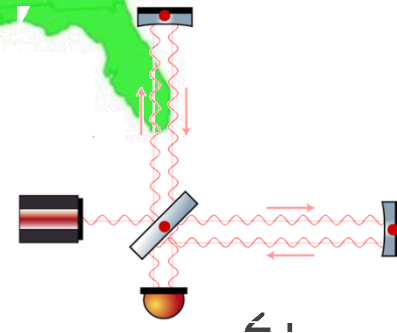
ハンフォード  
観測所



リビングストン観測所

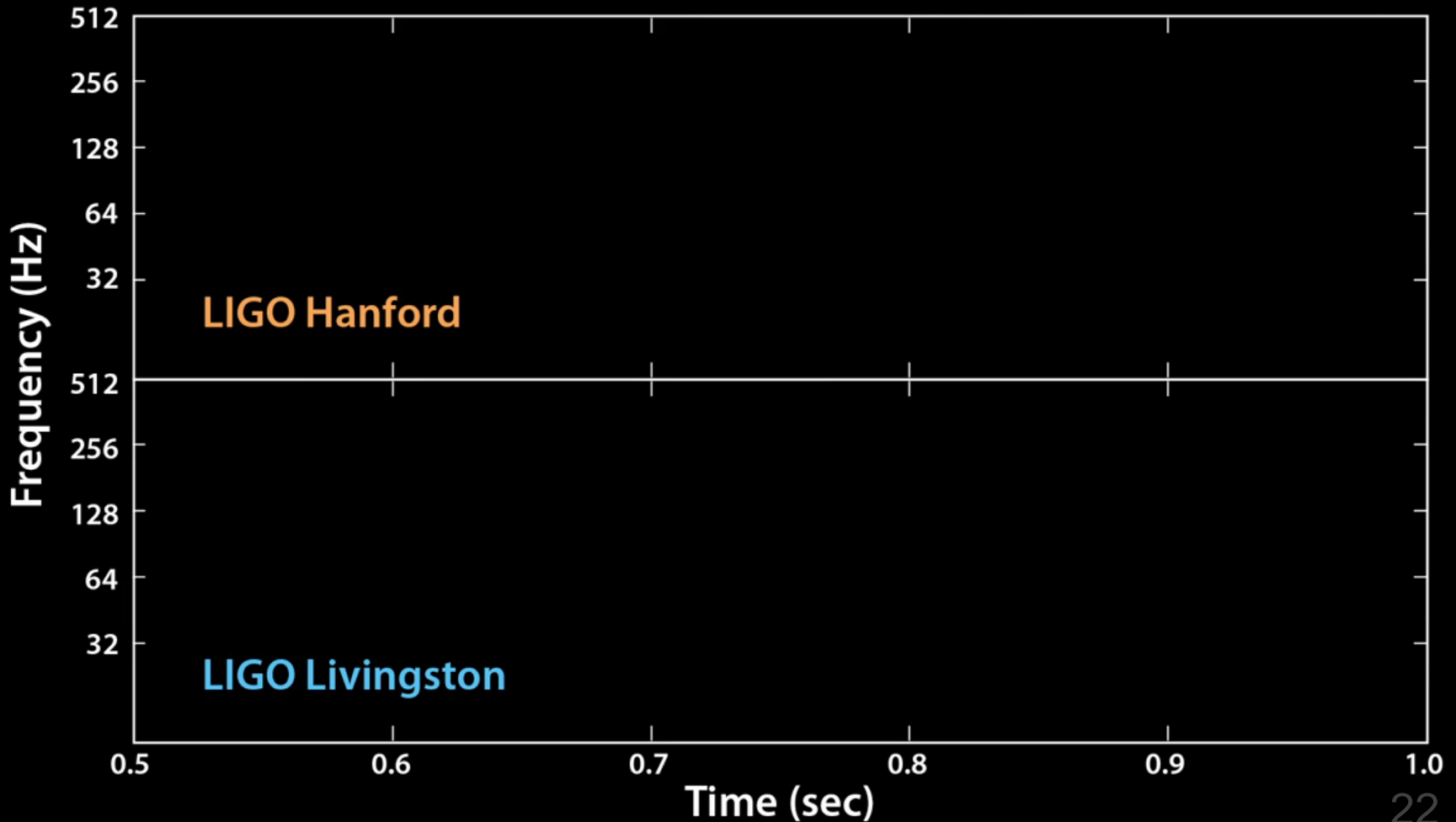


4 km



# 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



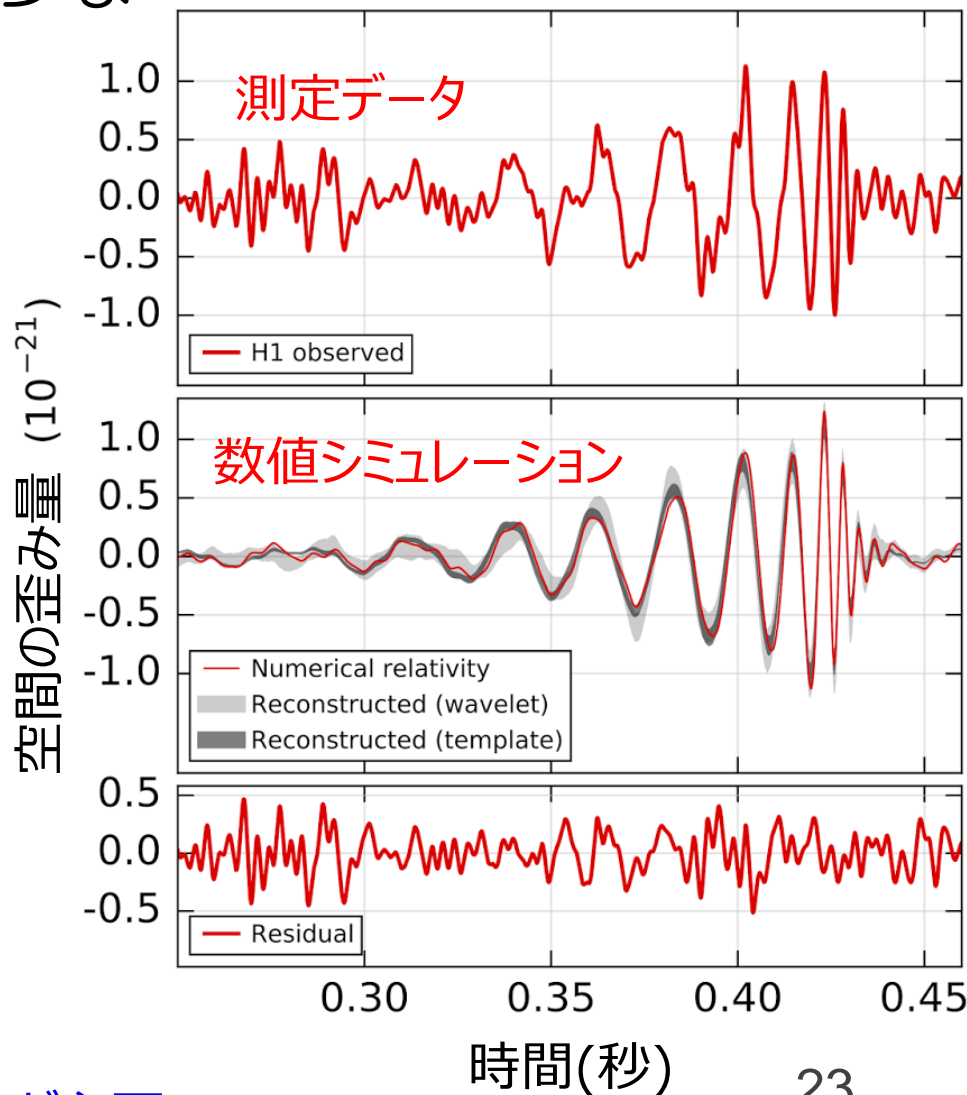
# 波形が相対論の計算とぴったり

- 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

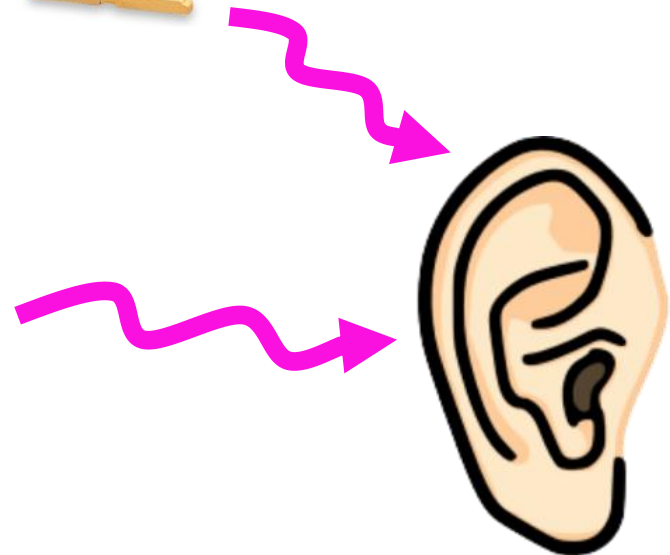
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音



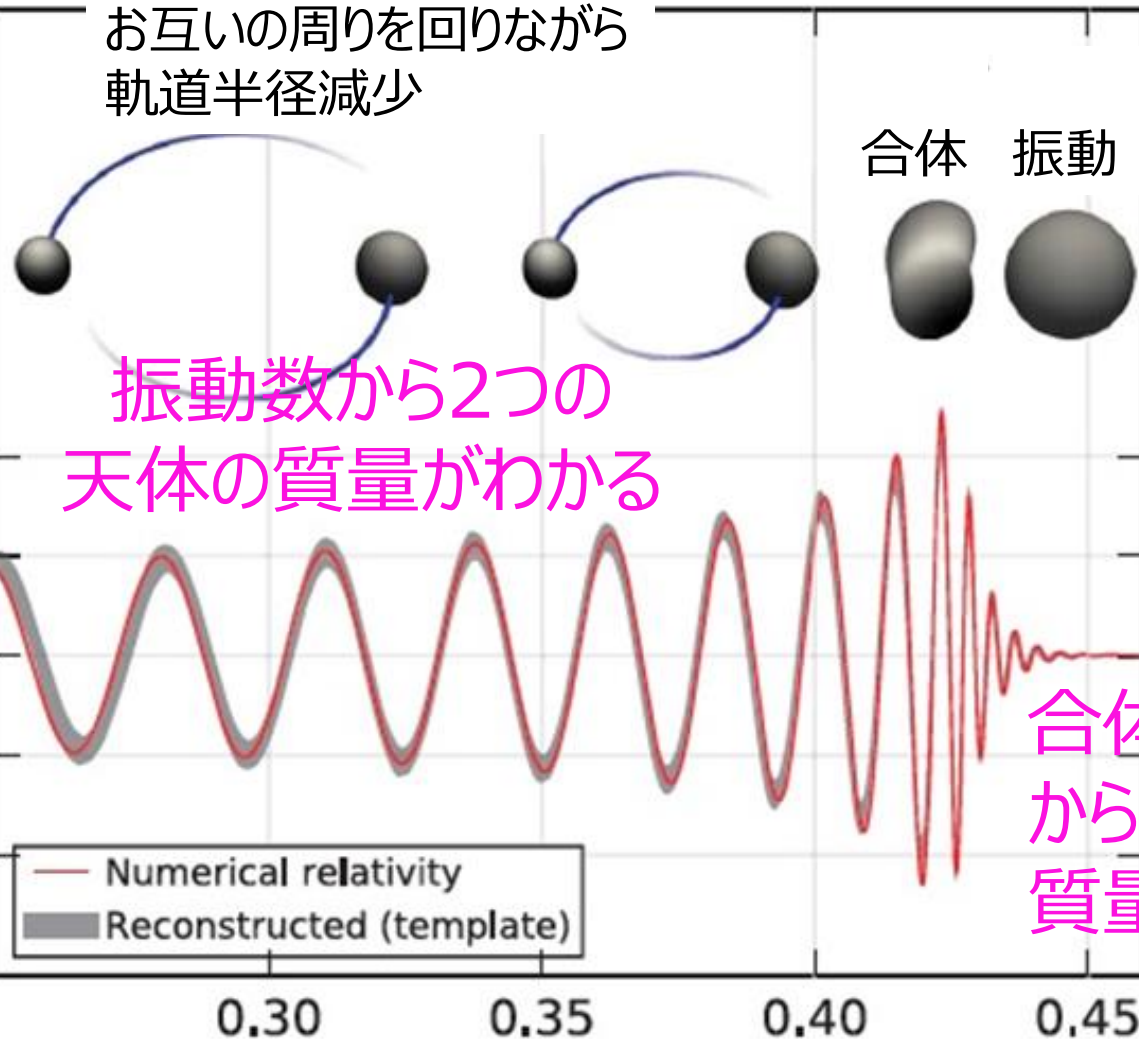


# 重力波形から何がわかるか？

- 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

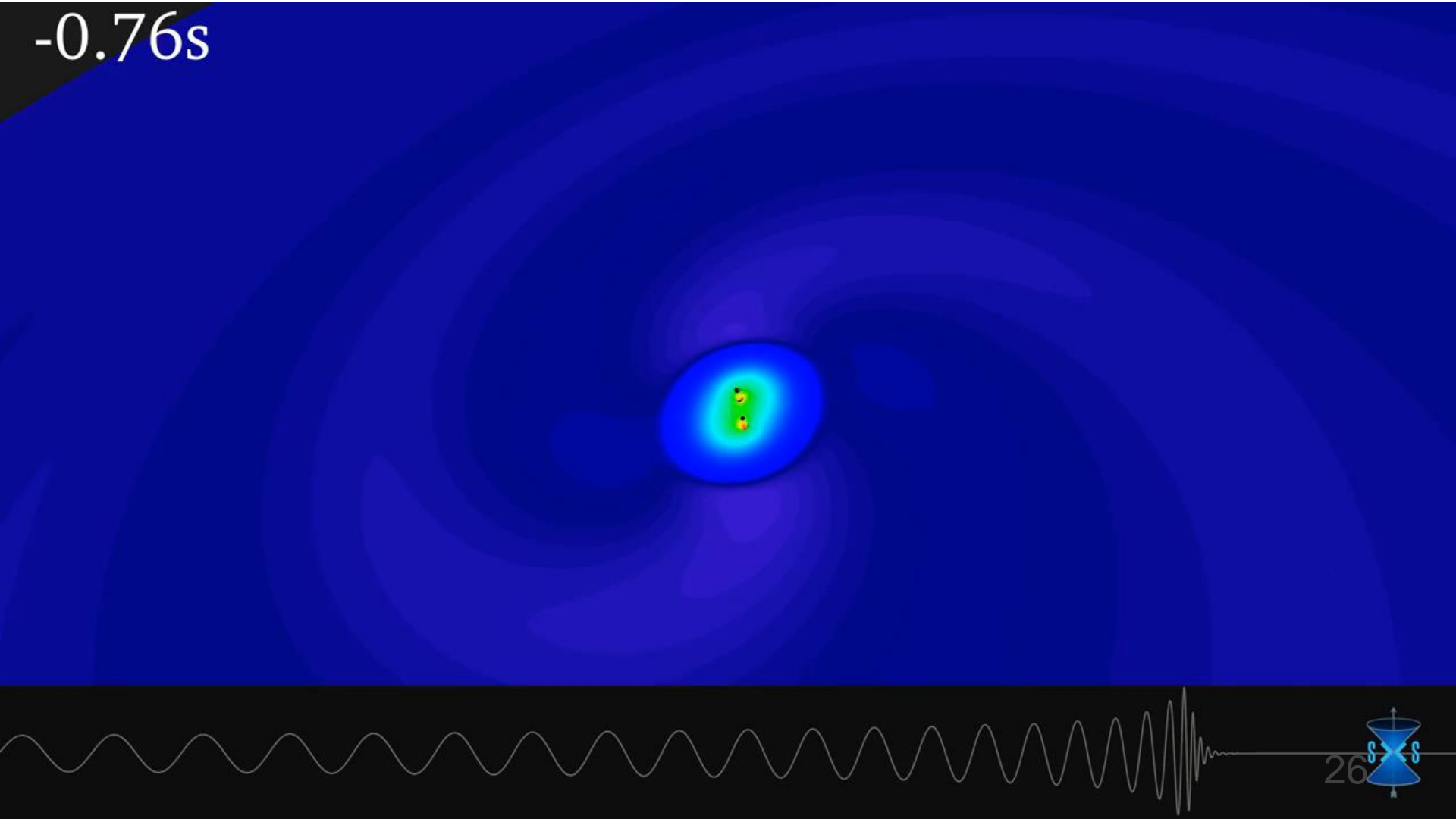
振動数から2つの  
天体の質量がわかる

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

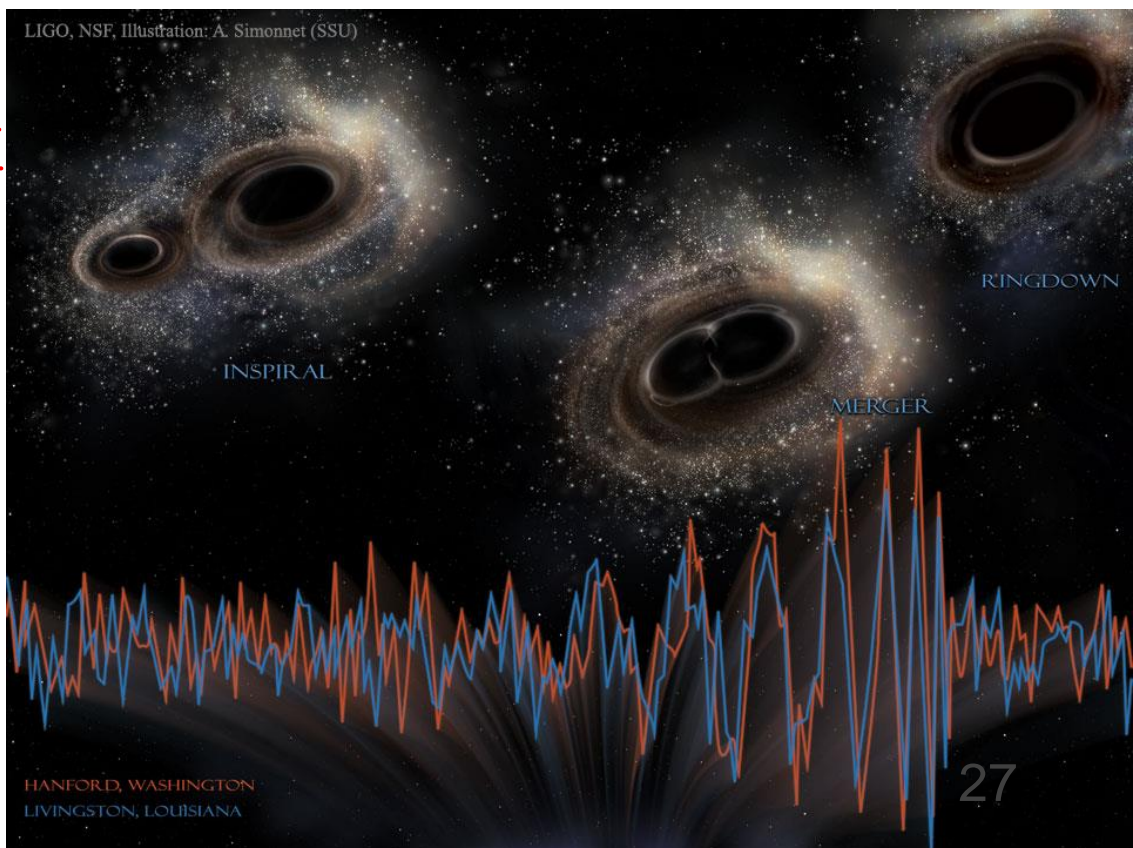
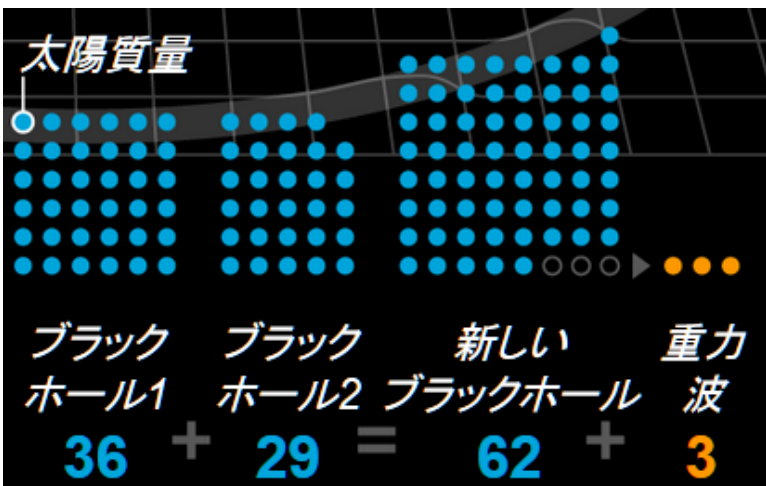


# 重力波形からわかったこと

- 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

$$E = mc^2$$

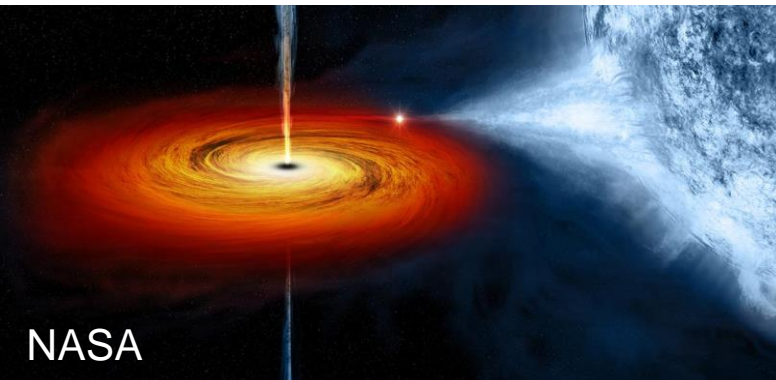


# ブラックホール質量の謎

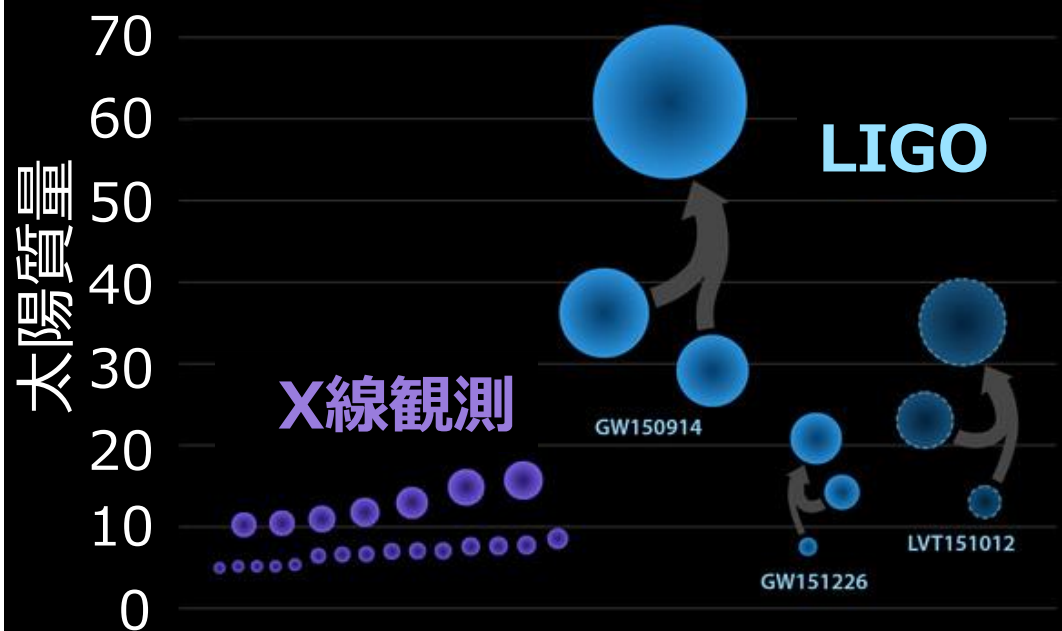
- これまでX線の観測で見つかったブラックホールはせいぜい10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか？

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)



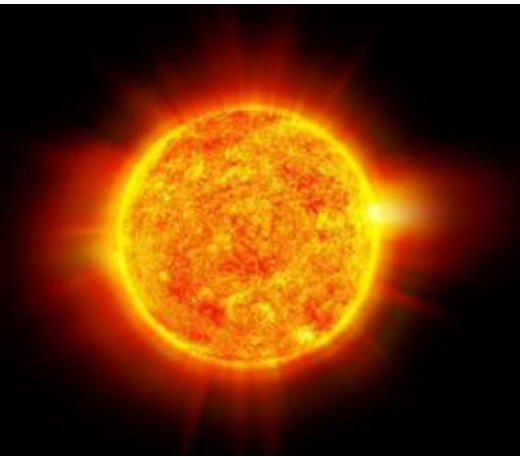
## 質量がわかっているブラックホール



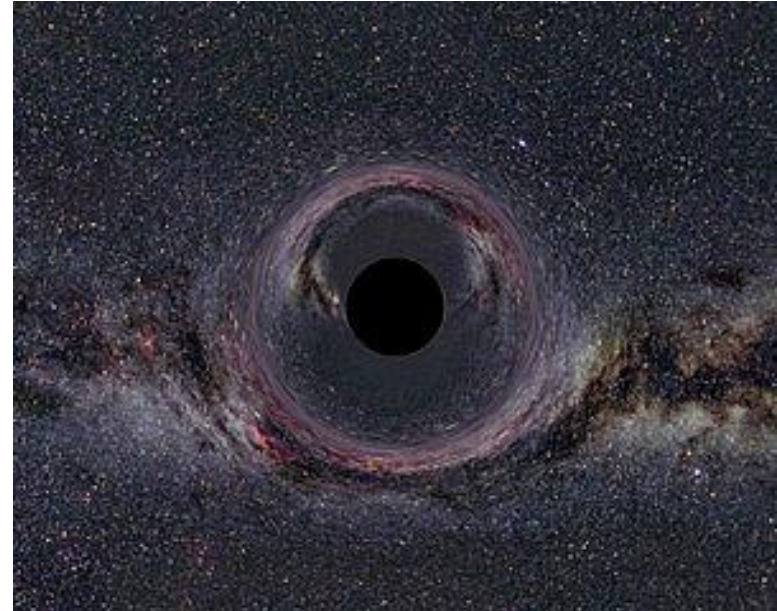


# ブラックホールはどうできる？

- 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

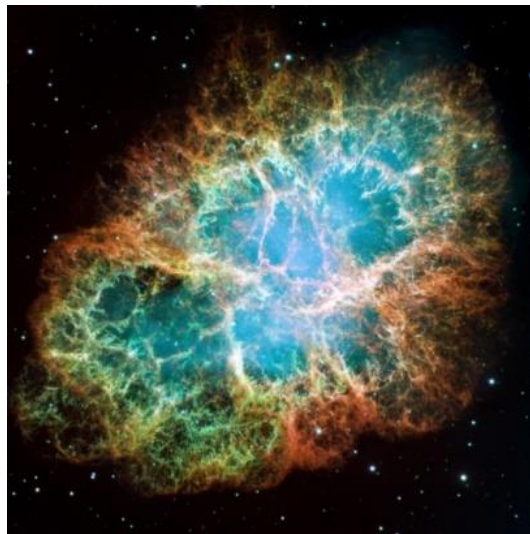


普通の星



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

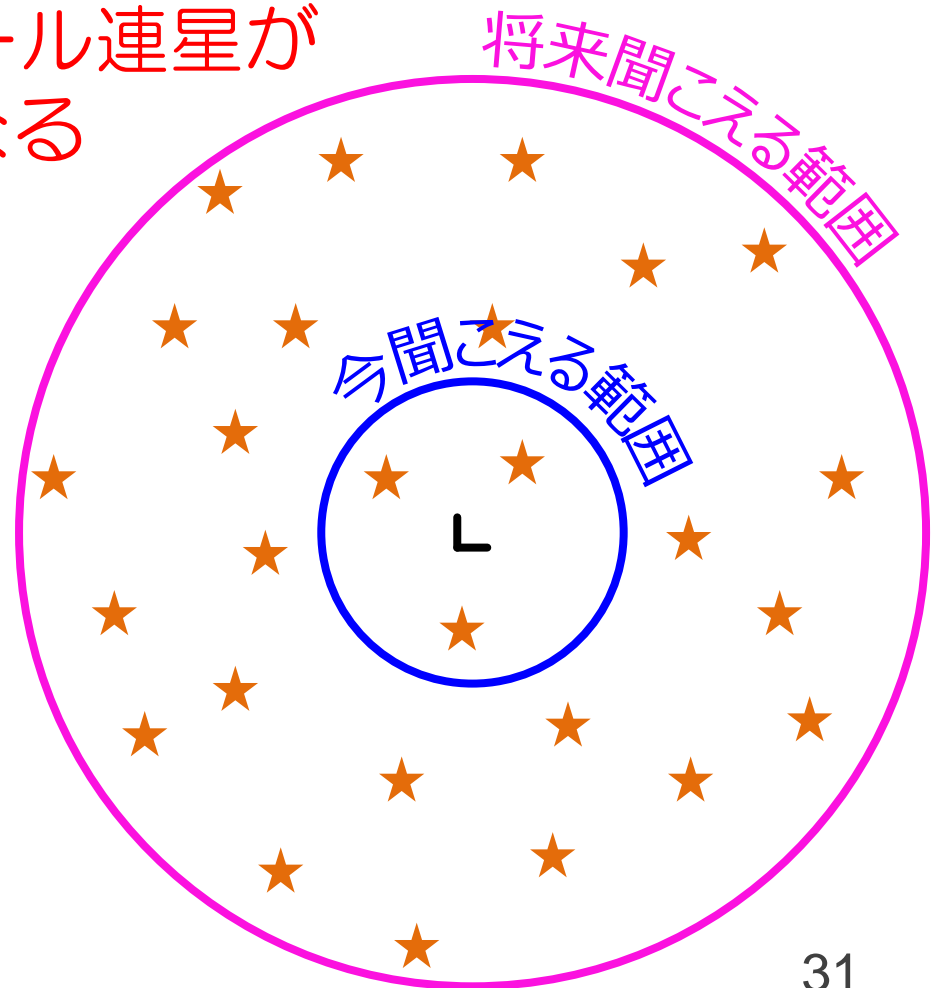
宇宙初期にできた  
大きな初代星から？

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

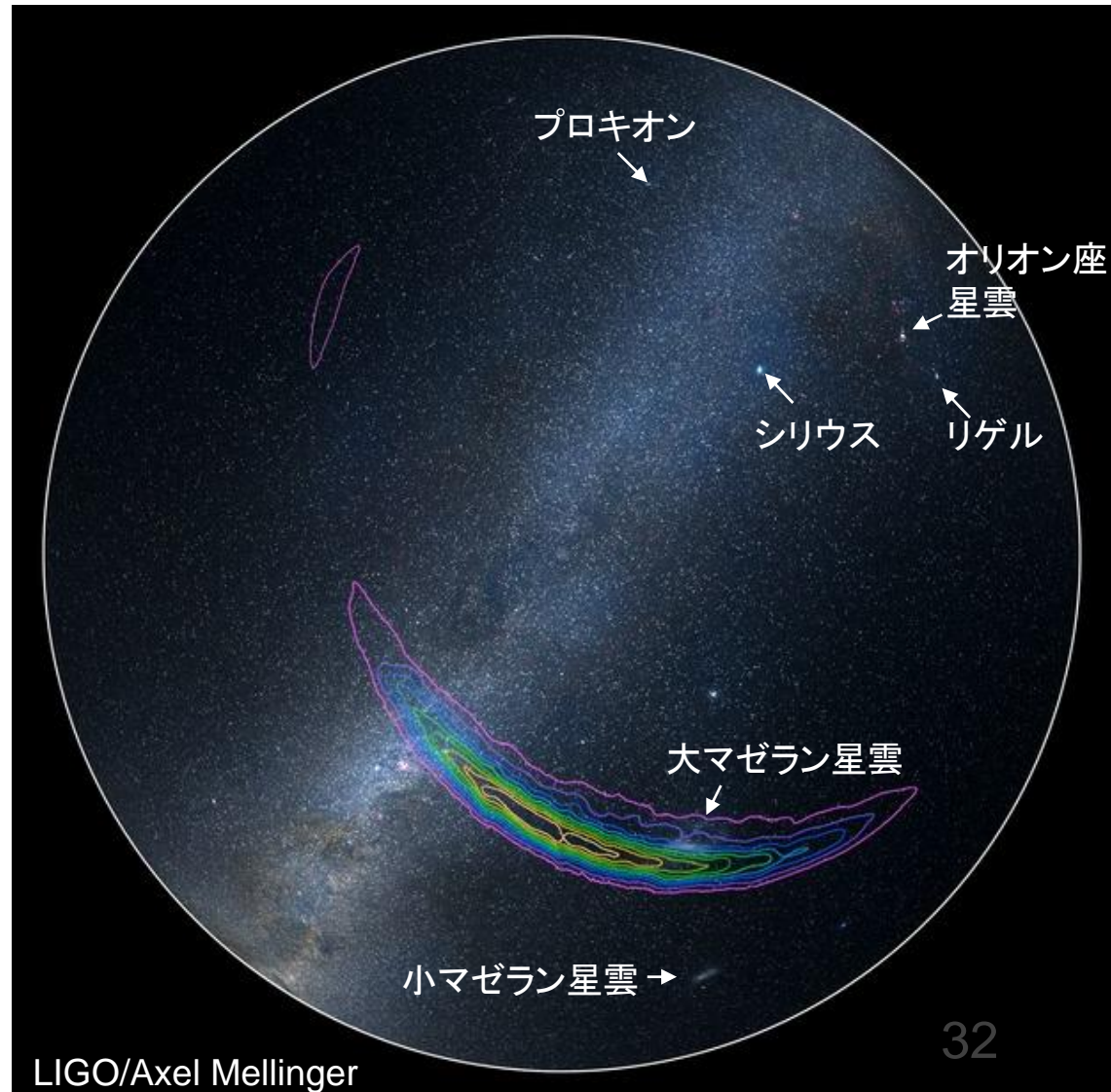
- LIGOは今後2-3年で感度を3倍にする予定
  - 3倍遠くまで観測できる
  - 27倍ブラックホール連星が見つかりやすくなる
- ブラックホール連星がたくさん見つかりると、質量分布や年に何個できるかが精度よくわかる
  - ブラックホールがどう生まれるのかがわかる





# 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

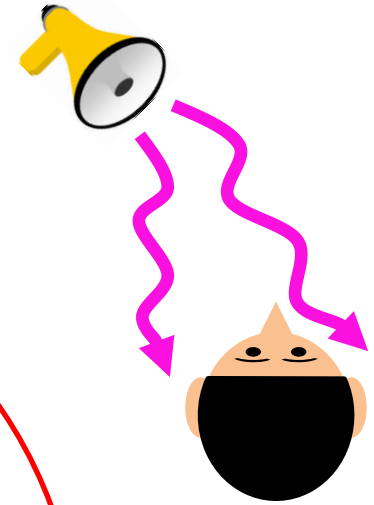
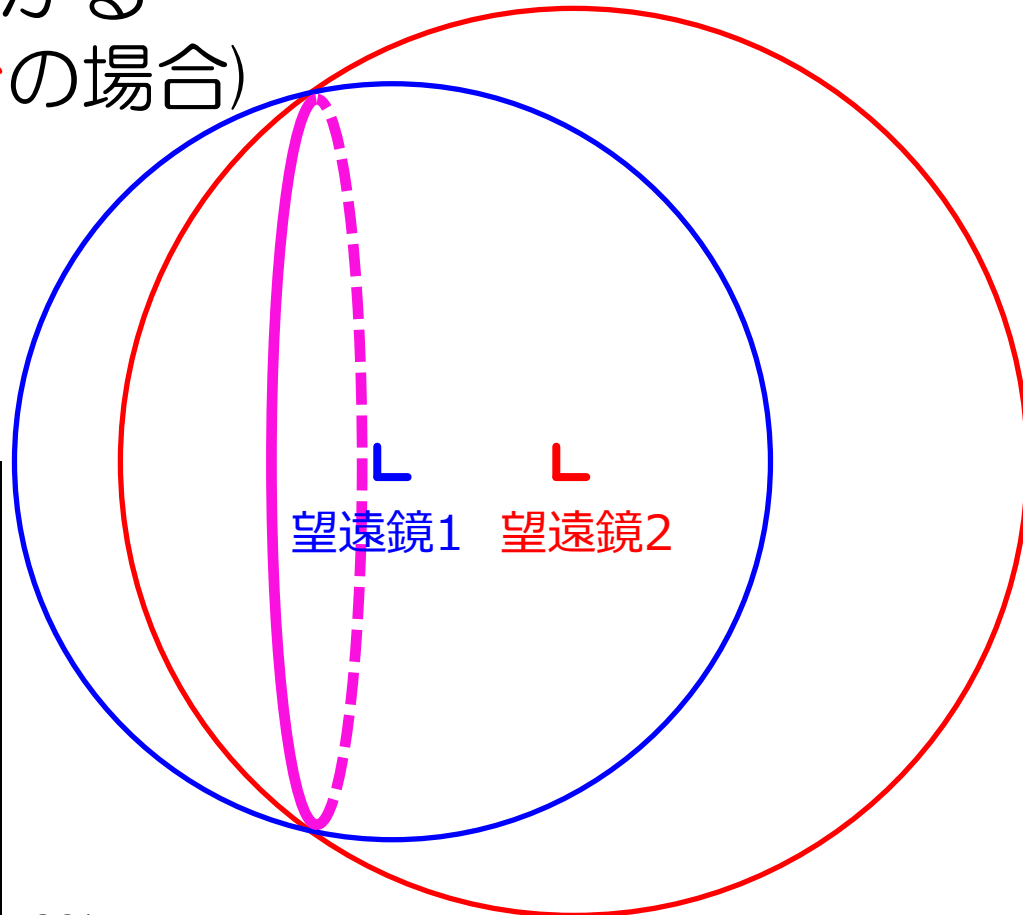


到達時刻にわずかな差が生じる

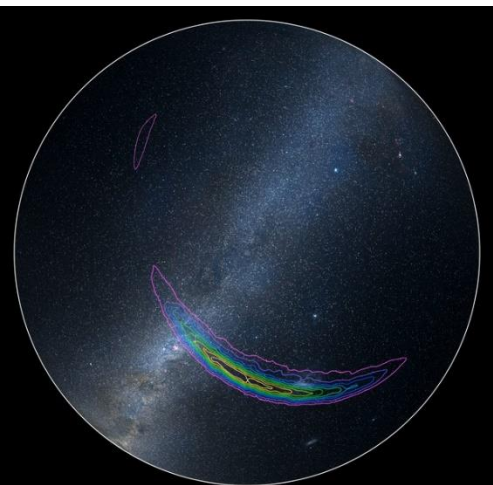
# 波源の特定方法

- 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

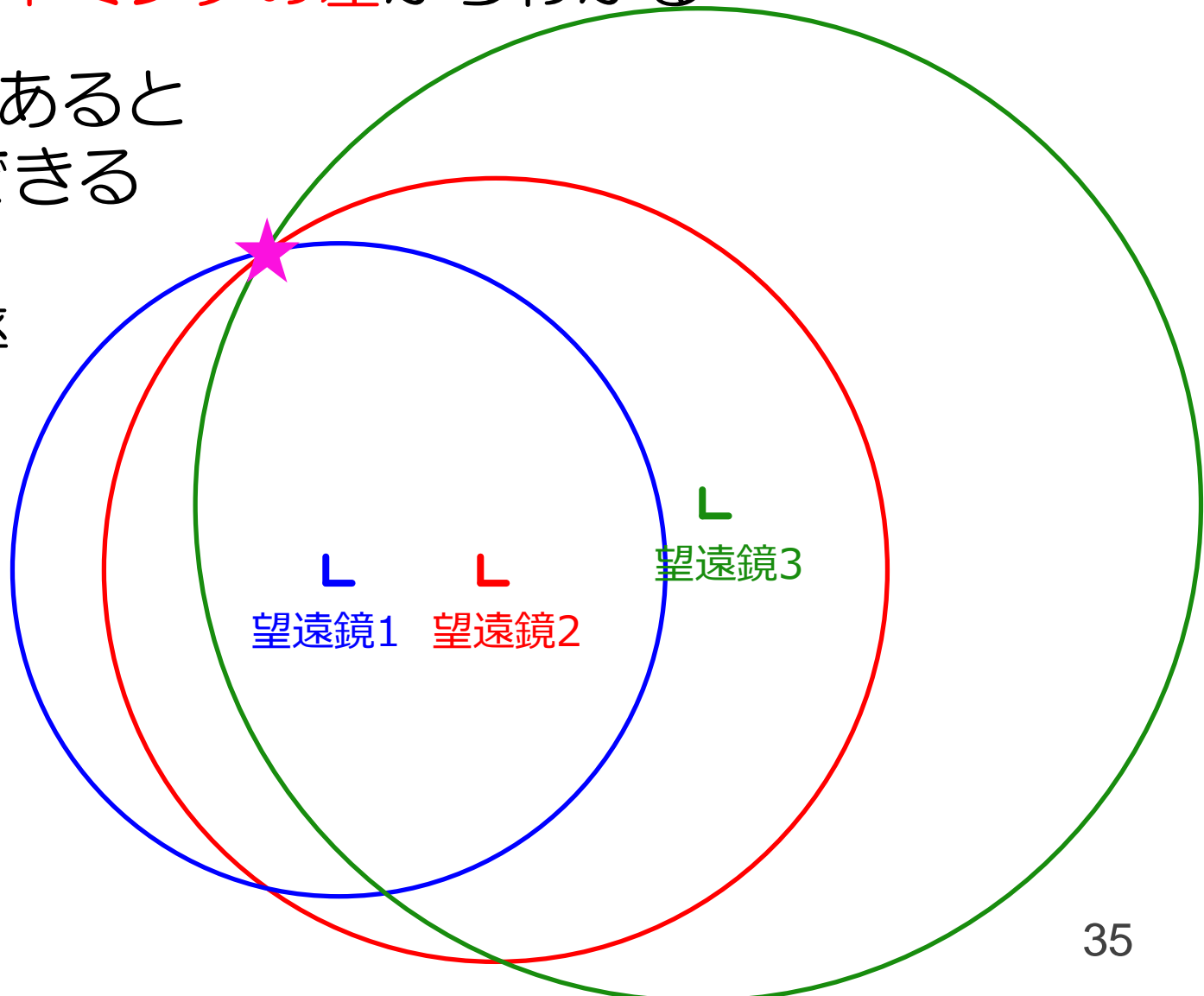


# 波源の特定方法

- 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



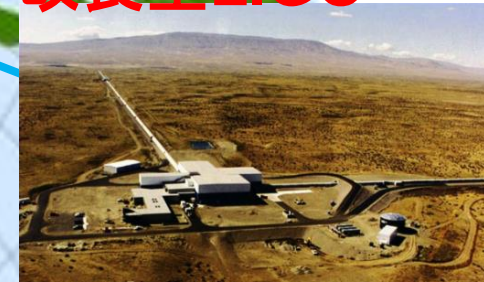
# 世界の重力波観測ネットワーク

- 各国で建設・改良が進行中

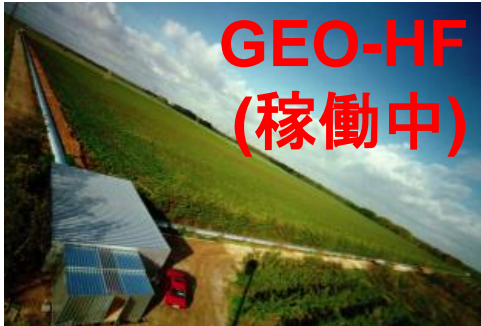
**改良型LIGO**  
(初検出後、改良中)



**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



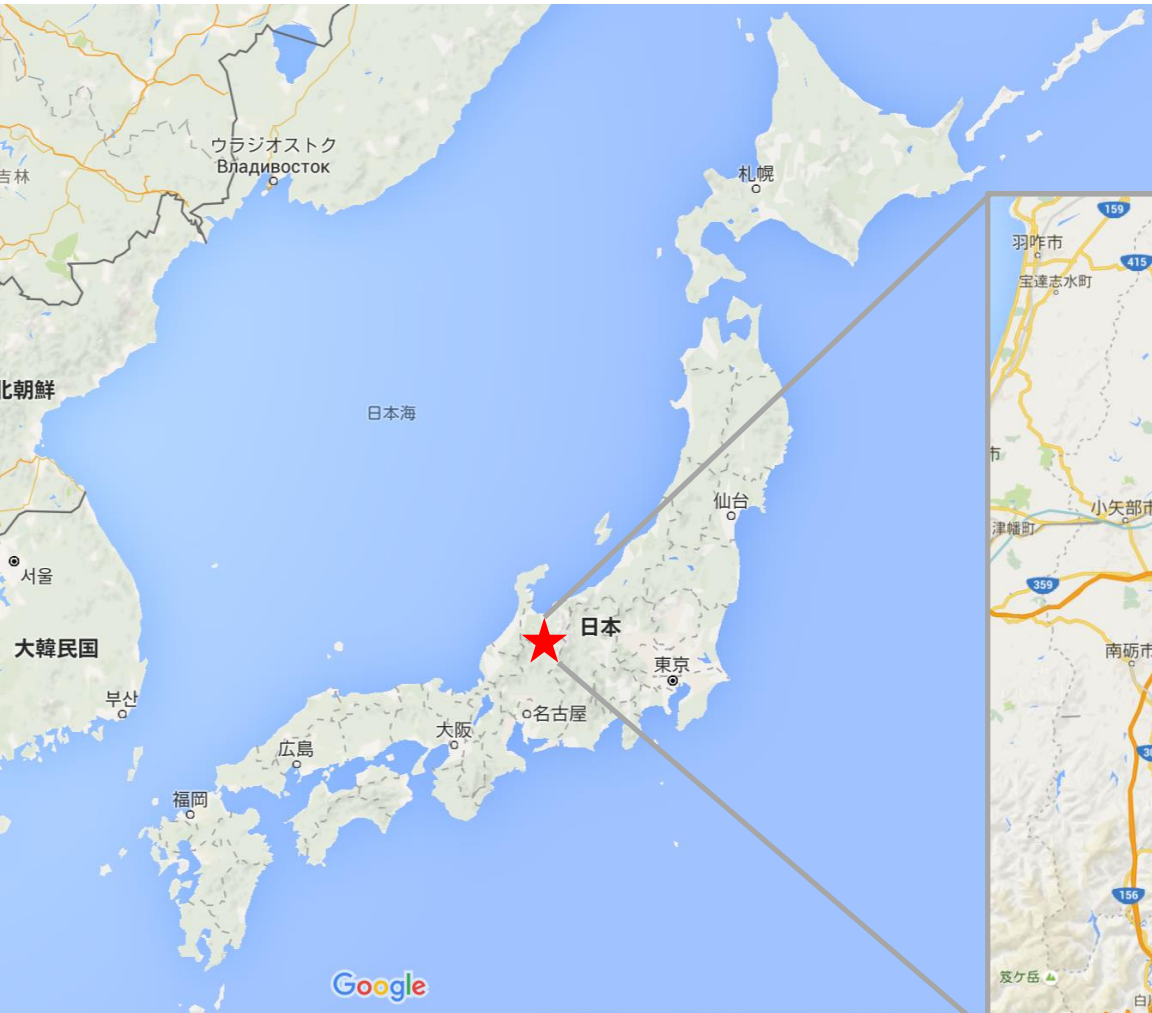
などなど

# 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

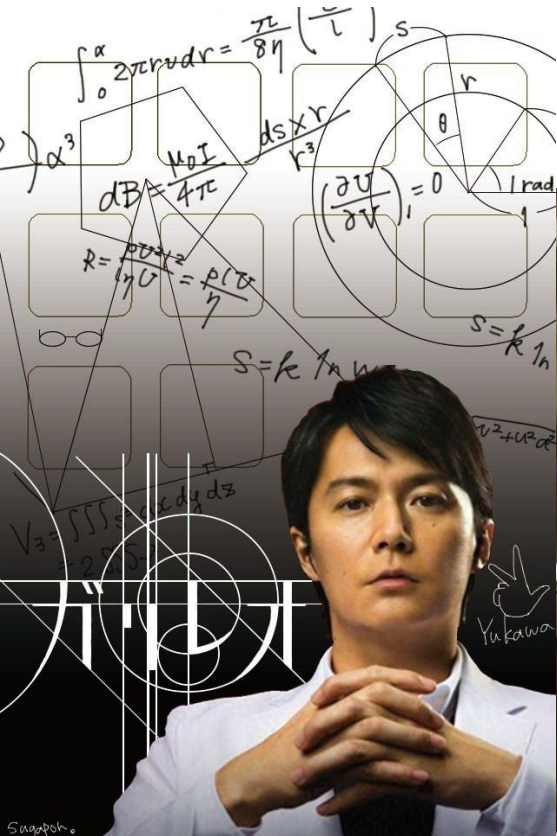
- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車





# 地下での作業

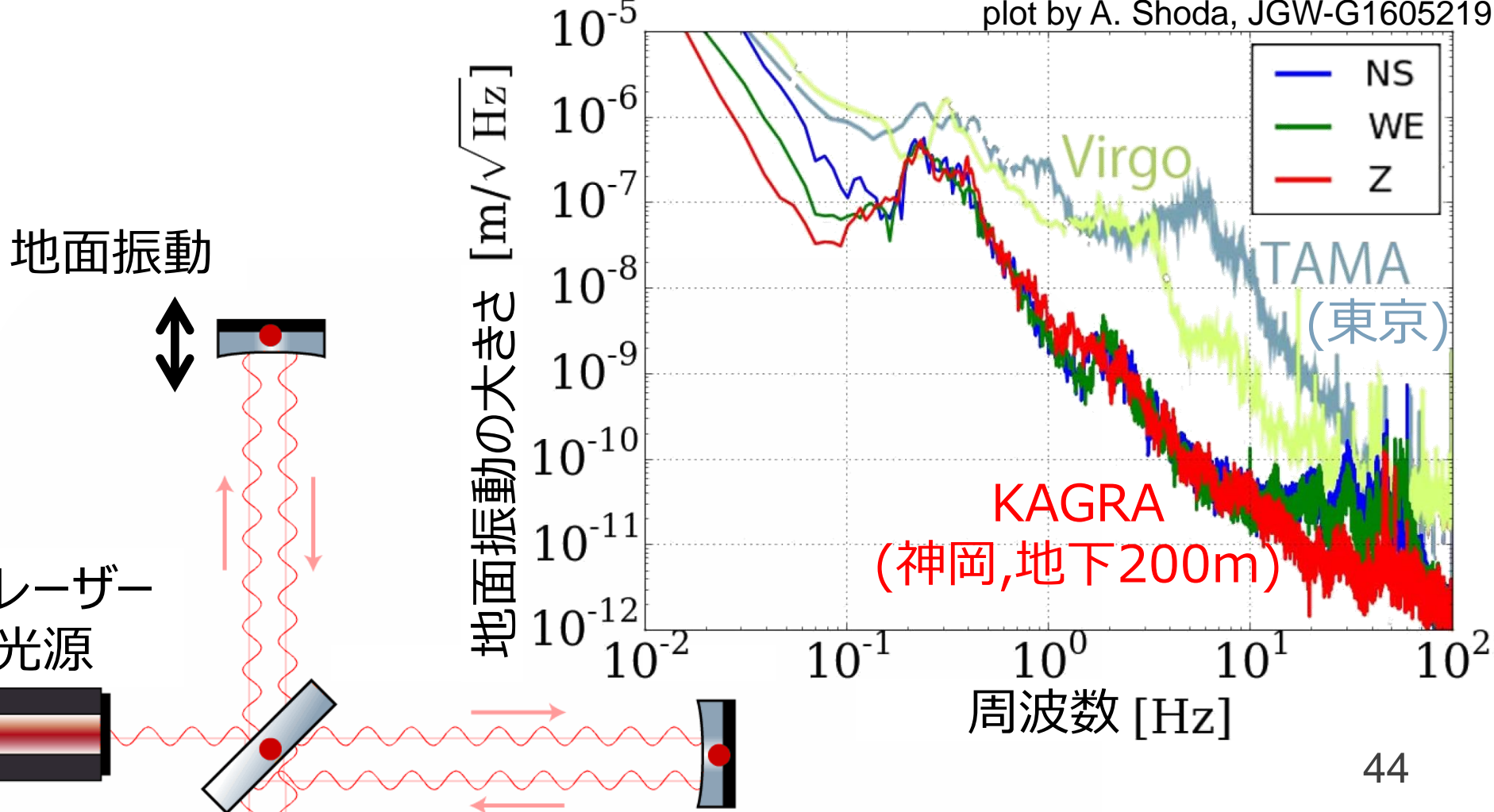
- 思ったのと違う！



# 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

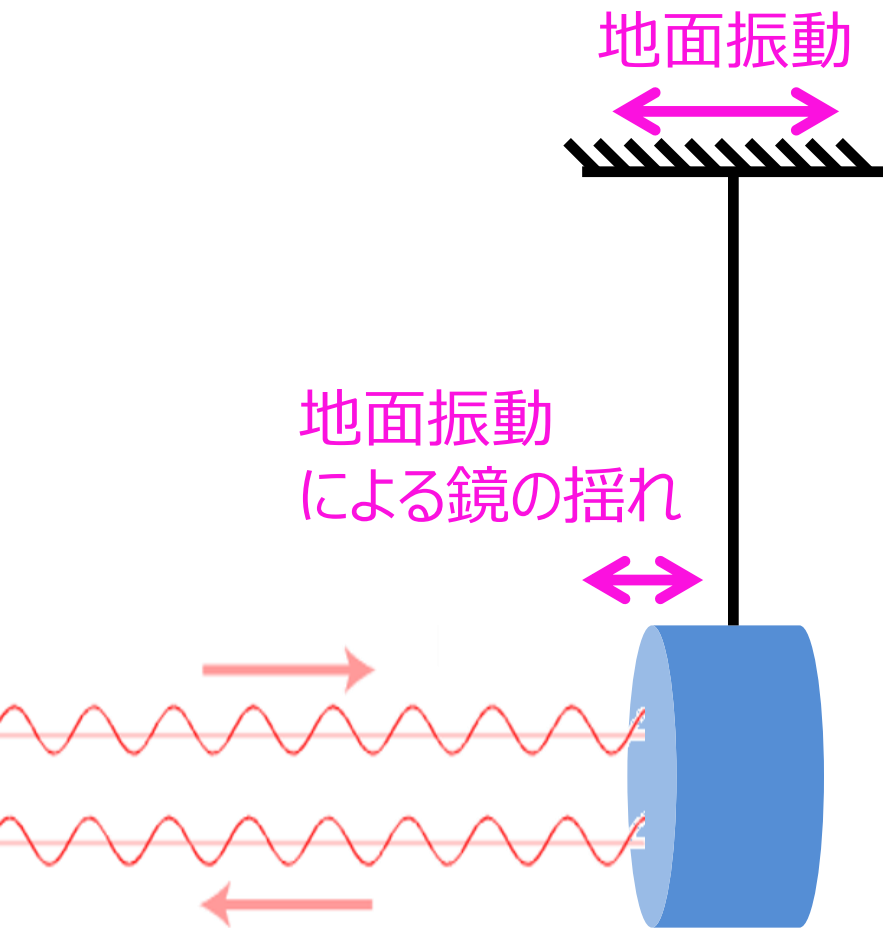
plot by A. Shoda, JGW-G1605219





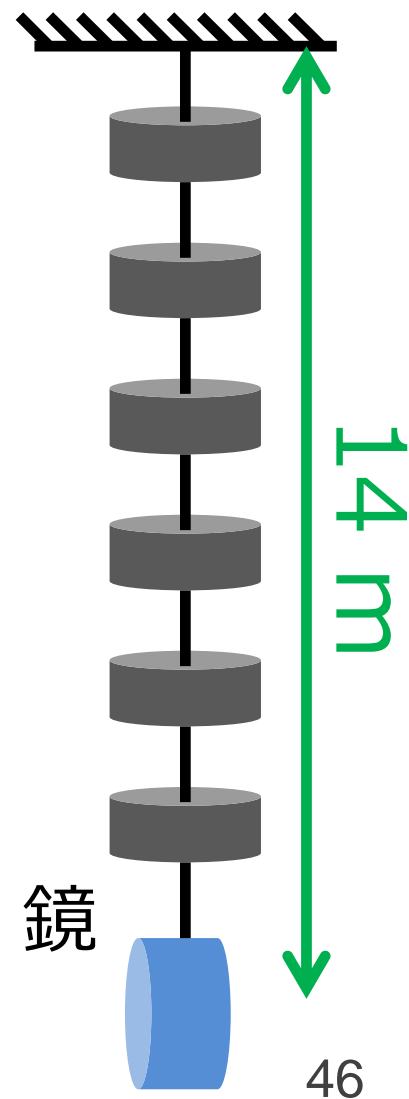
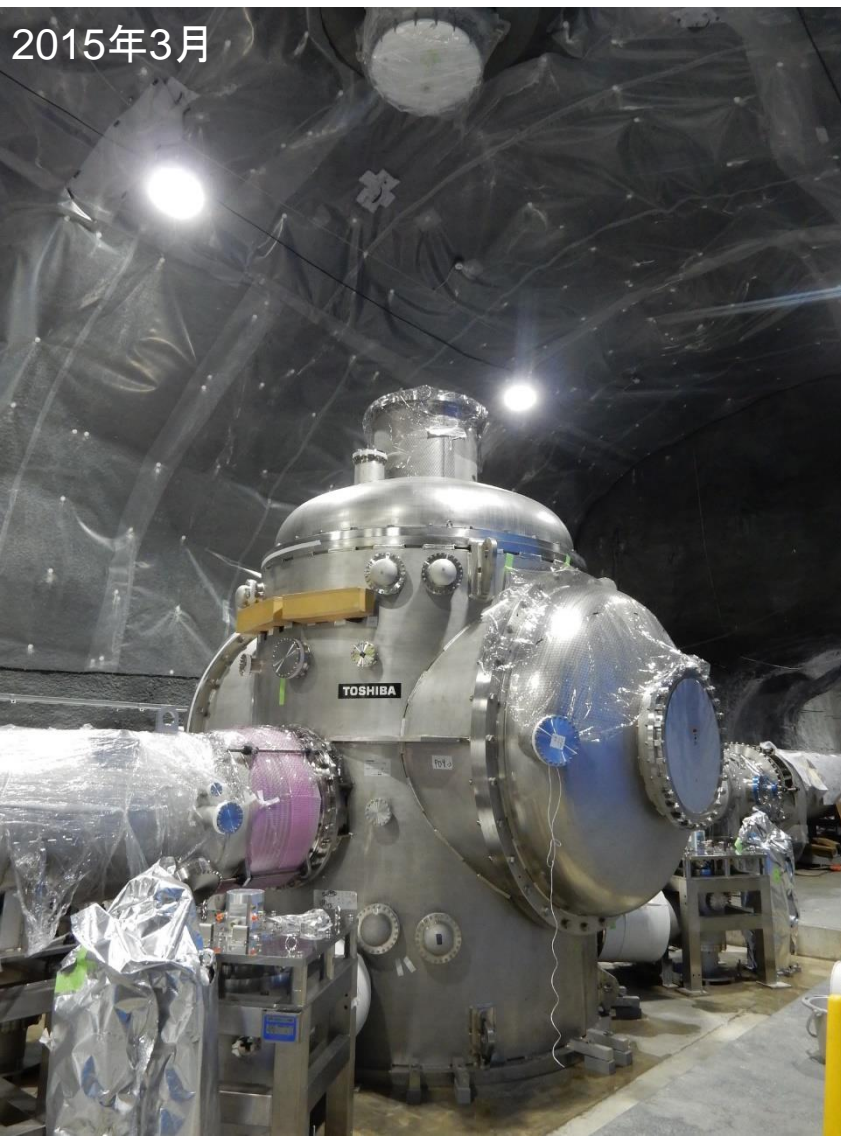
# 鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



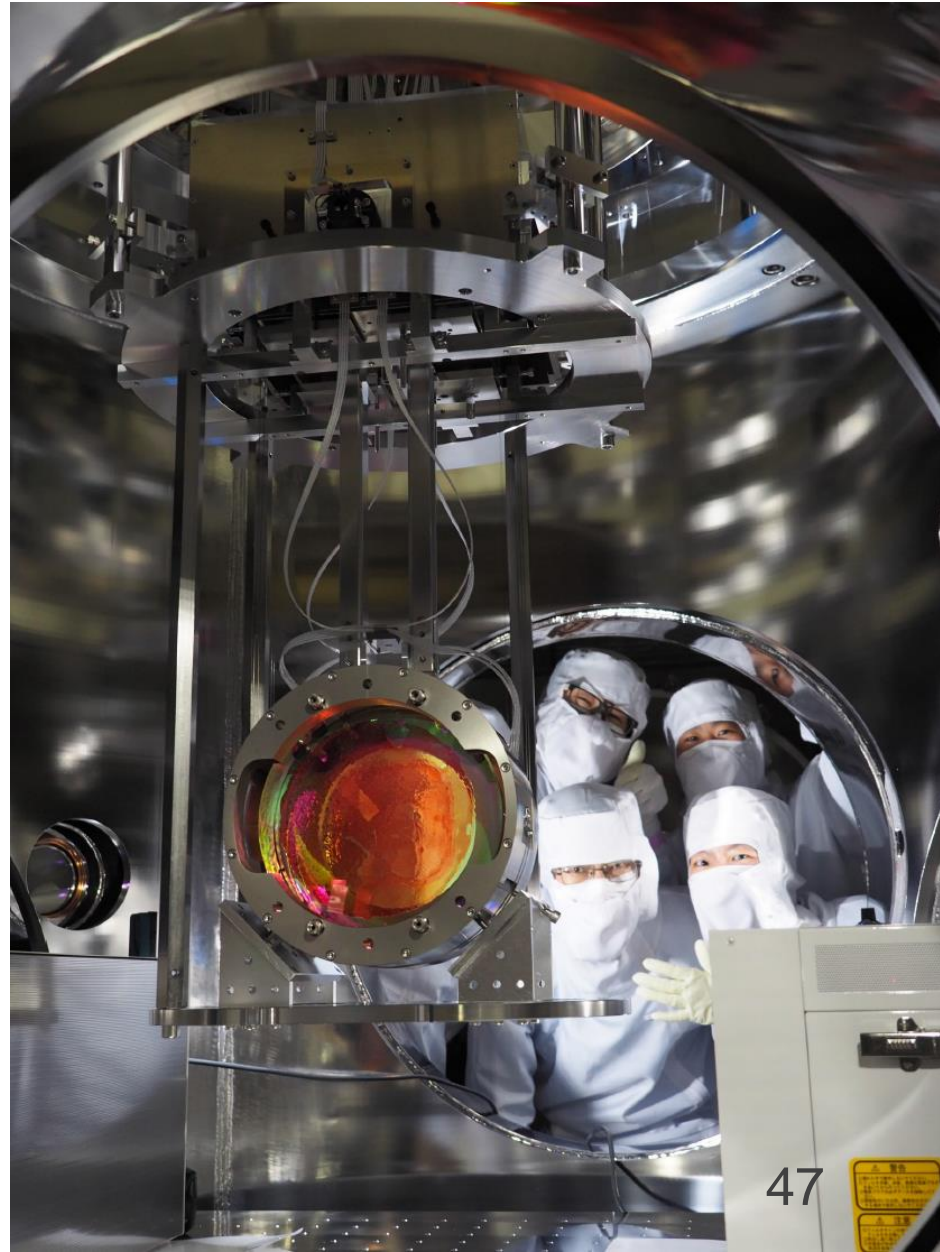
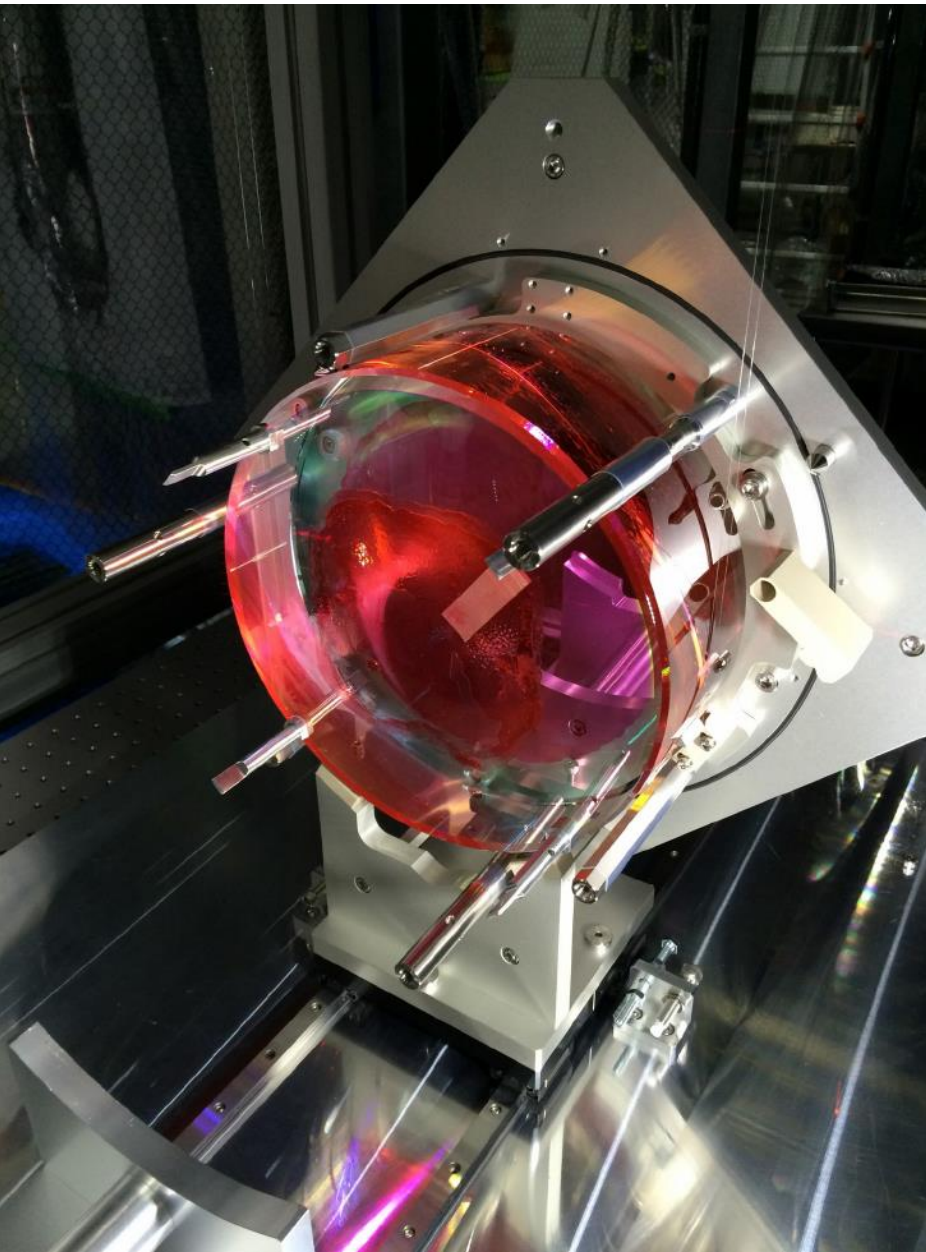
# KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振



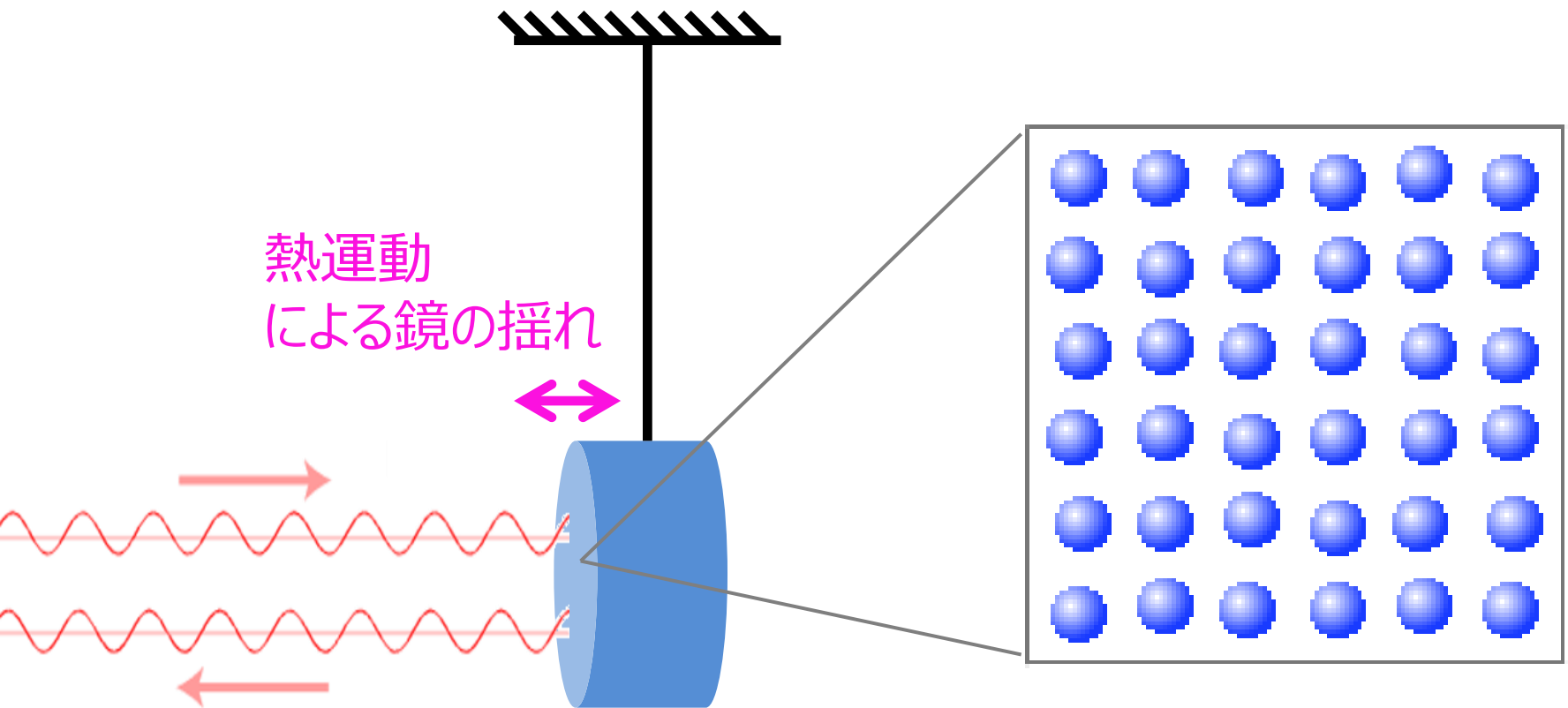


# KAGRAの鏡の防振装置



# 鏡を冷やすことで熱雑音低減

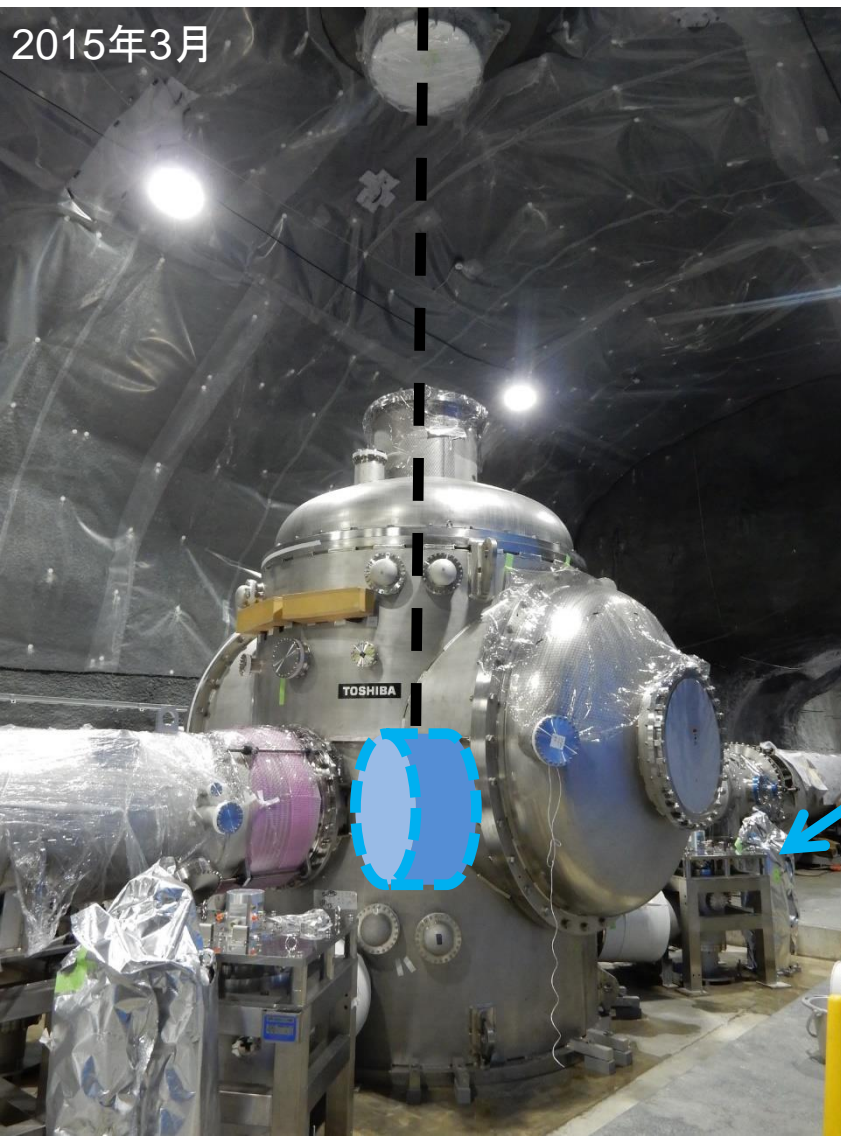
- 鏡を作る原子の熱運動で鏡の表面が揺れると、雑音になる
- $-253^{\circ}\text{C}$ まで冷やすことで熱運動を小さくする



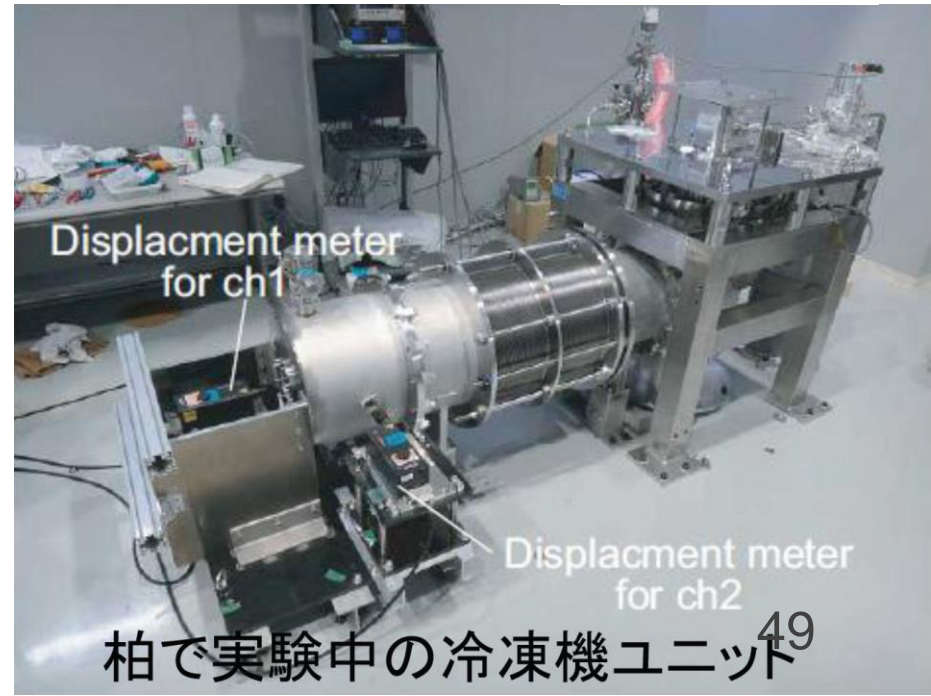


# KAGRAの低温装置

- 最低振動の冷凍機を開発



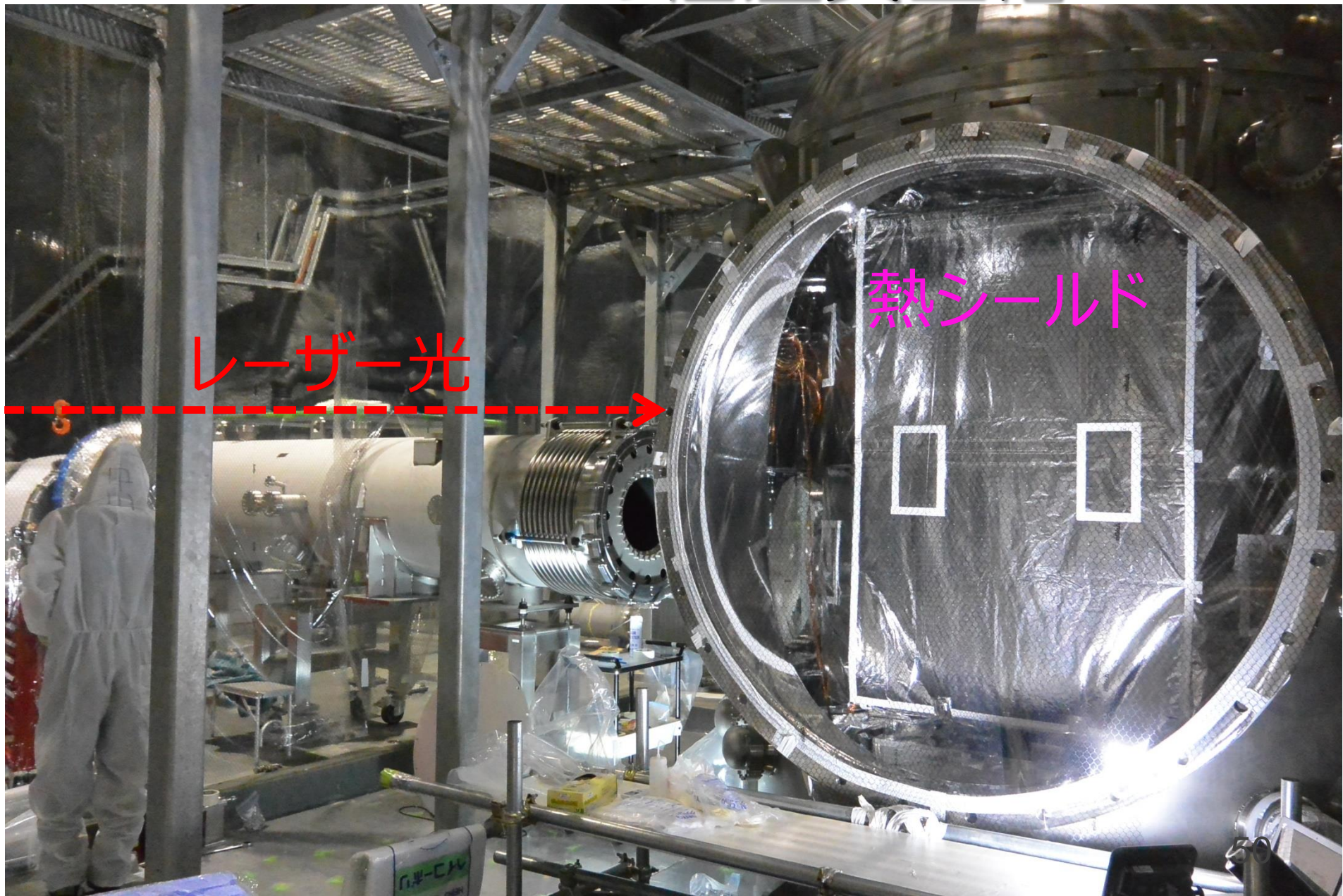
冷凍機



柏で実験中の冷凍機ユニット<sup>49</sup>

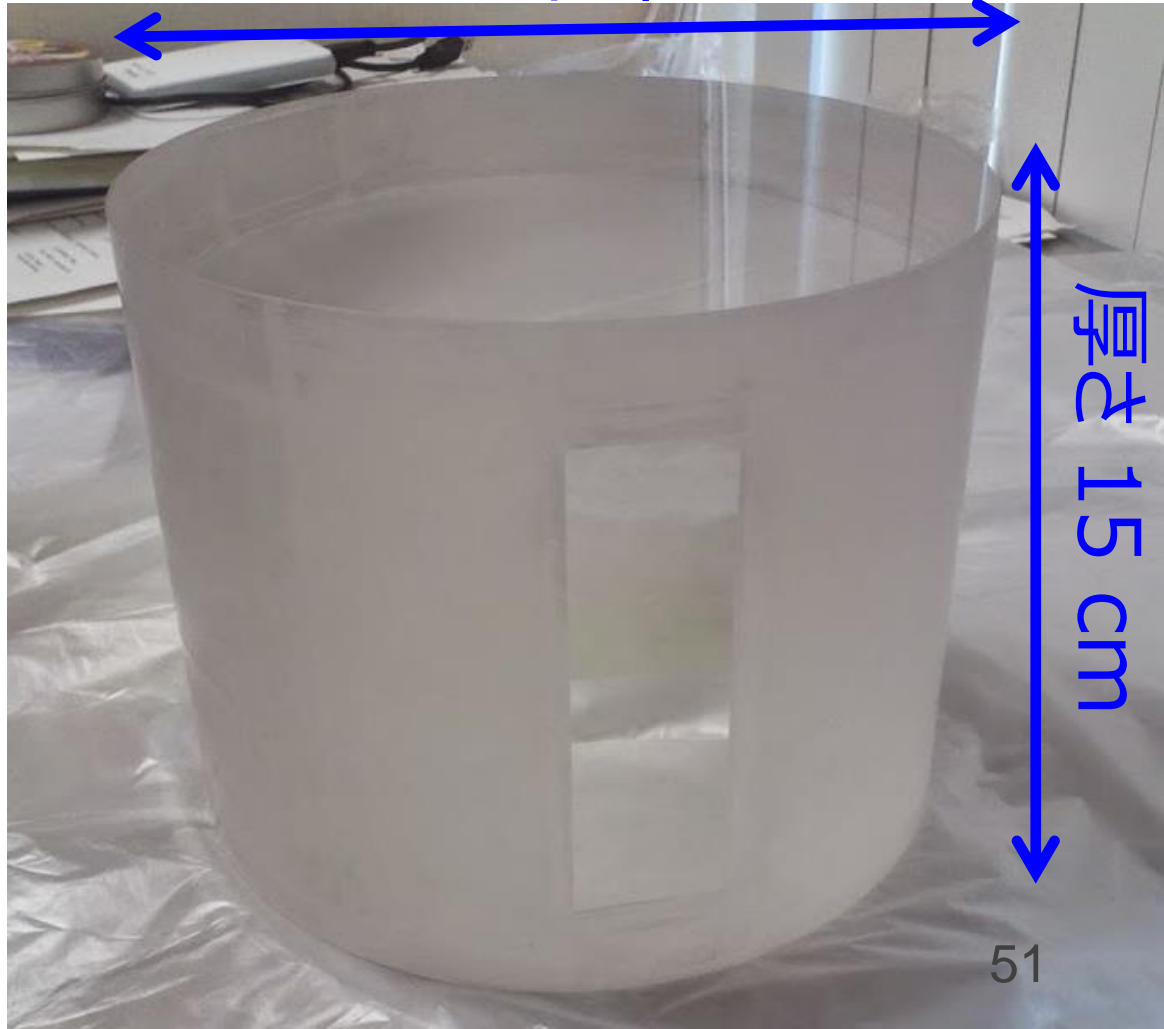


# KAGRAの低温真空槽



# 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





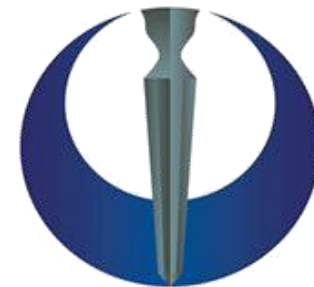
# KAGRAのクリーン環境

- 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



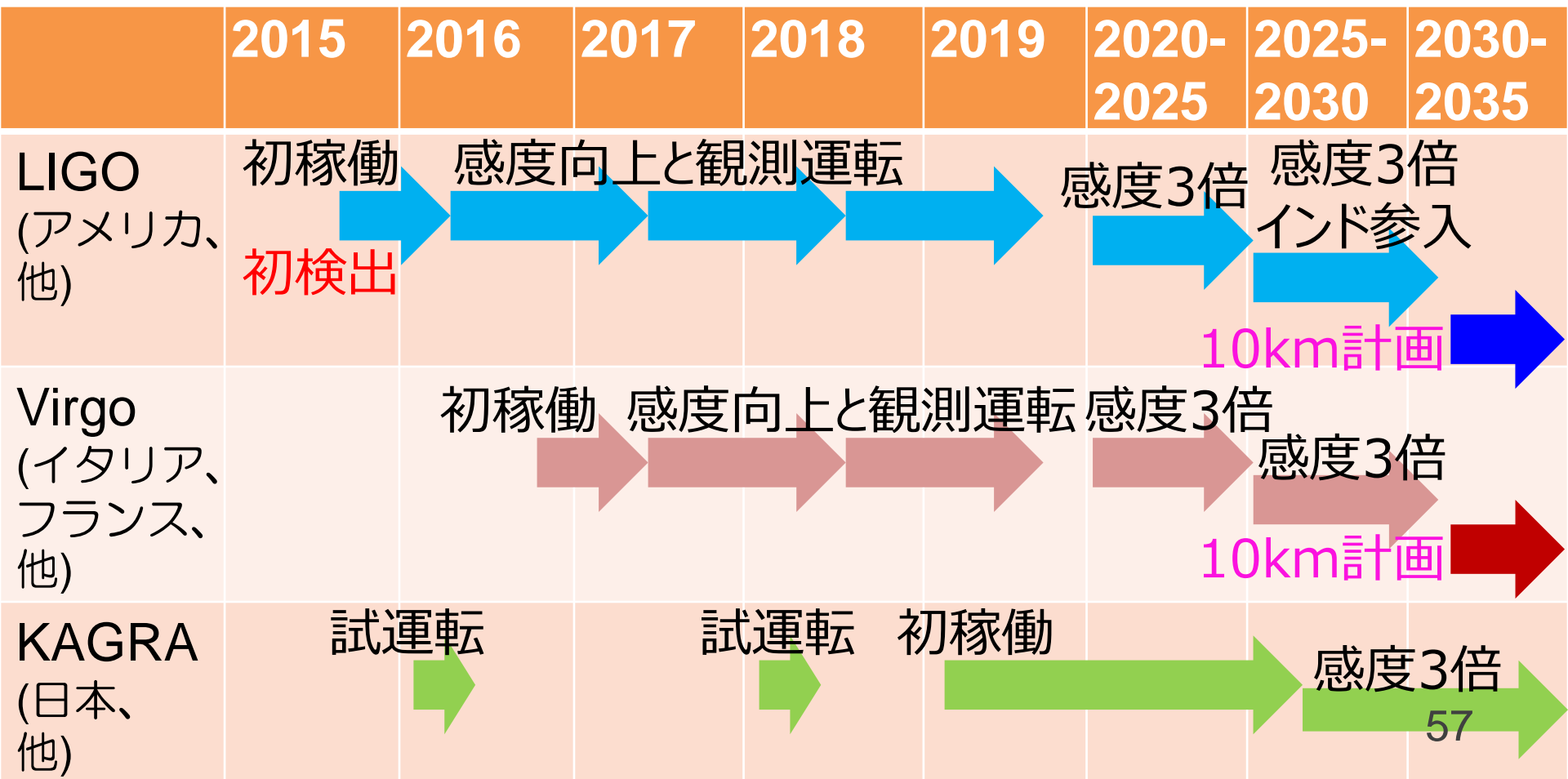
# KAGRAの現在の状況

- 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

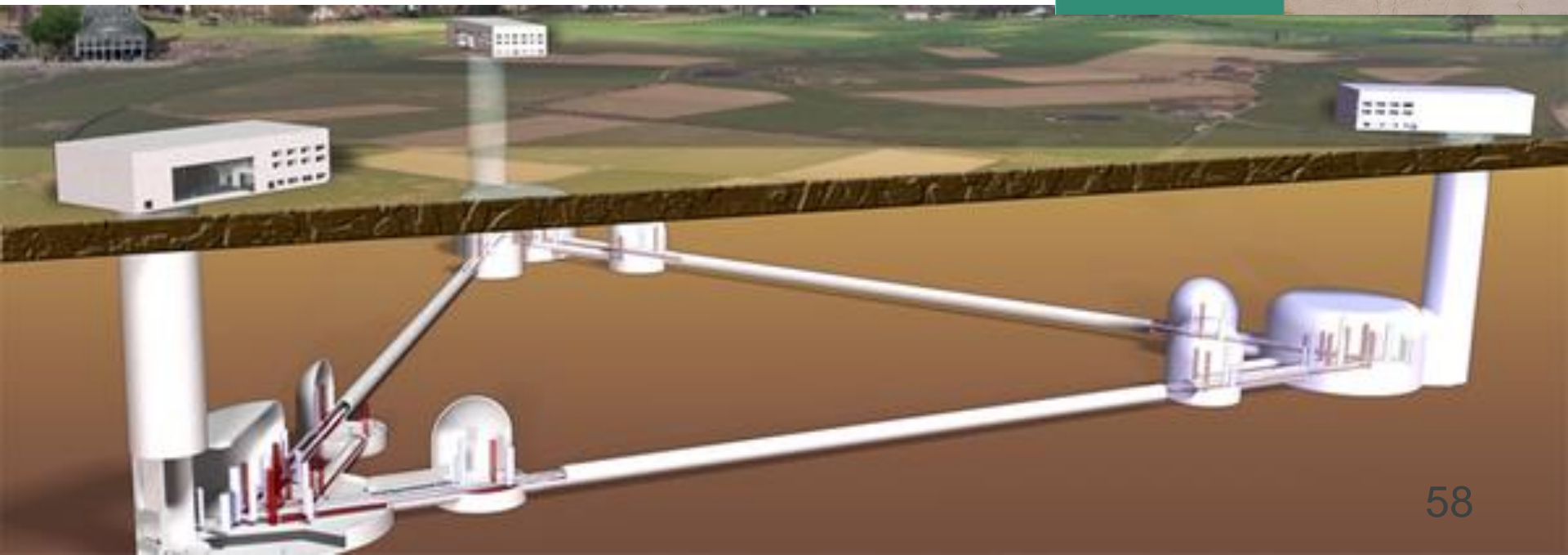
中性子星連星 超新星爆発  
からの重力波？ からの重力波？  
さらなる 連星の 連星の形成  
ブラックホール連星の発見？ 波源特定？ メカニズム解明？





# 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

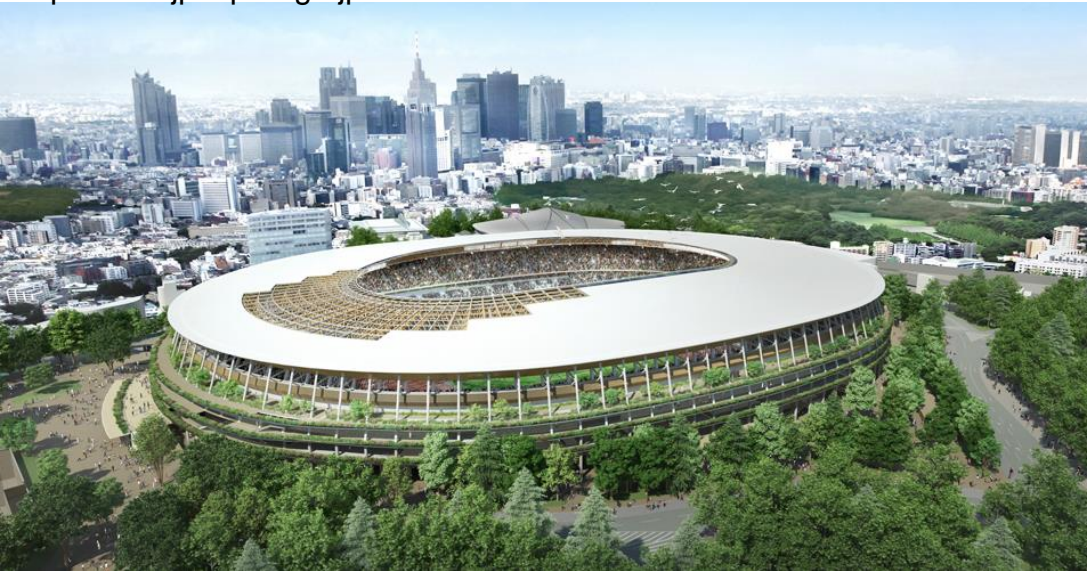
- ちなみに.....

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



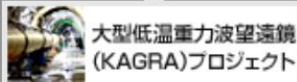
English

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  
commons



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