

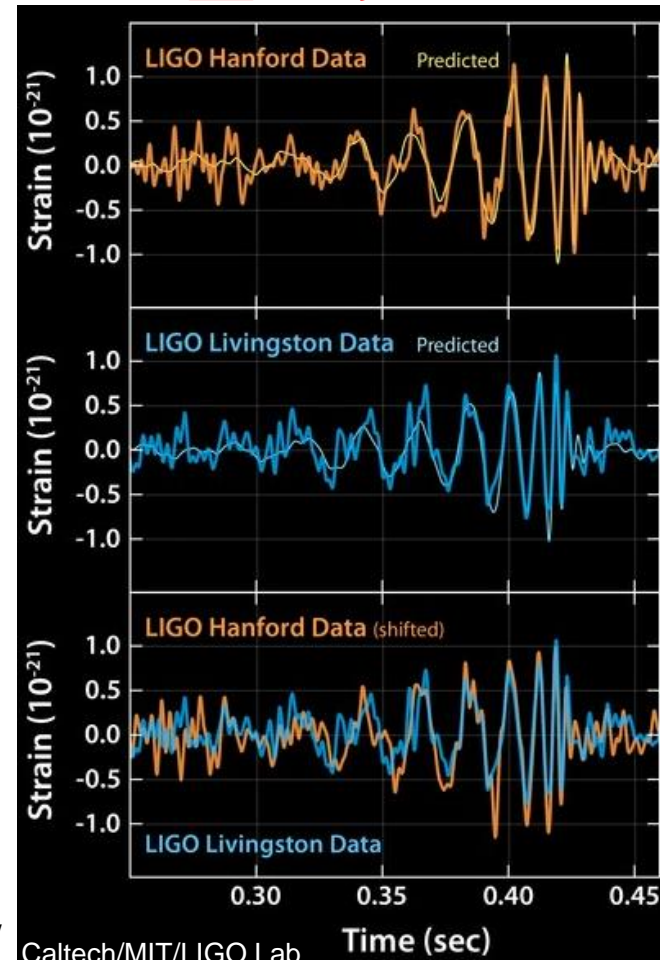
# 重力波望遠鏡KAGRAで聞く！ ブラックホール誕生の声

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**



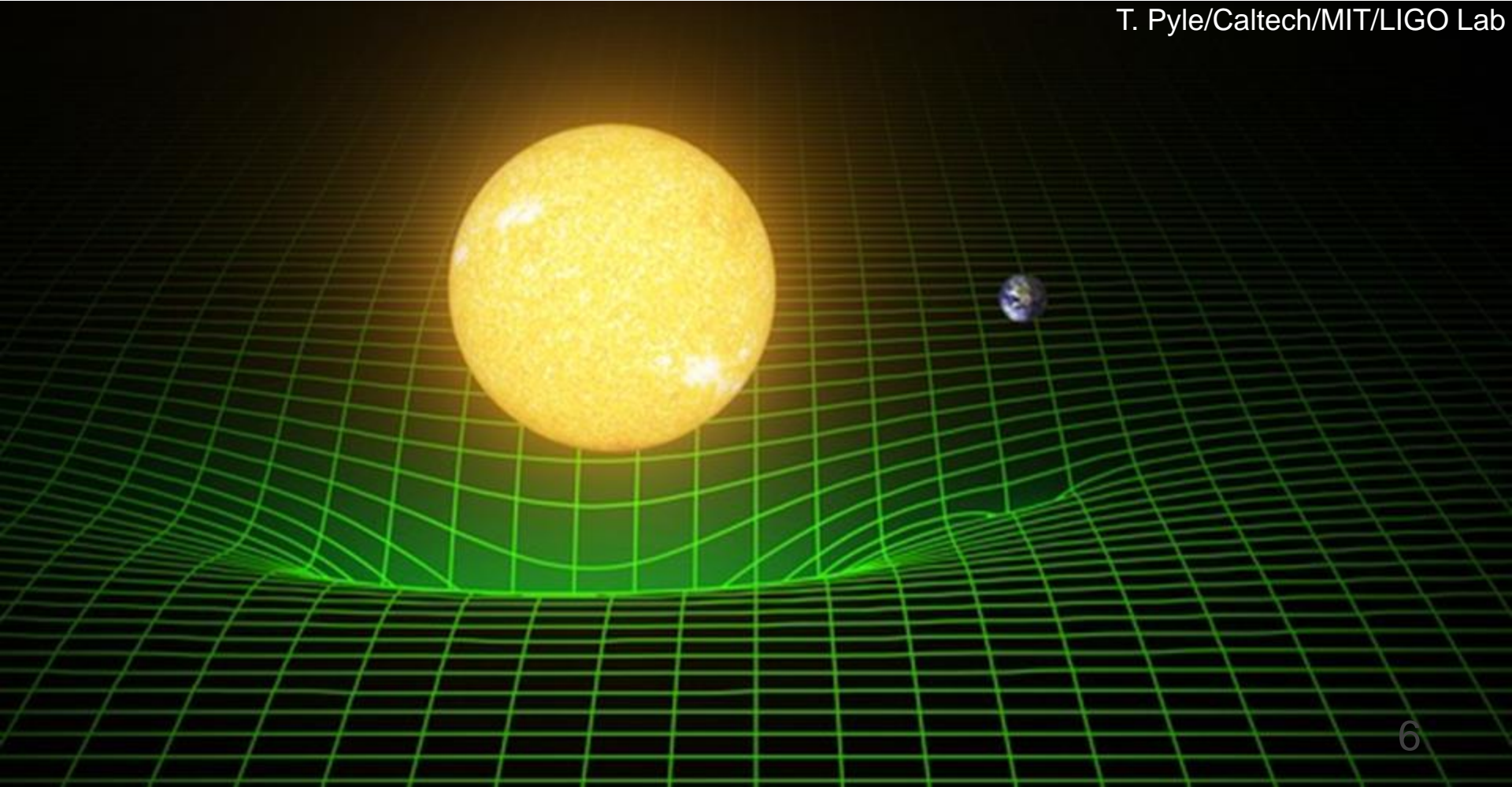
# 今回のお話

- 重力波とは？
  - 一般相対性理論と重力
  - 重力波を放出する天体
  - 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

# 一般相対性理論と重力

- 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



# 一般相対性理論と重力

- 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

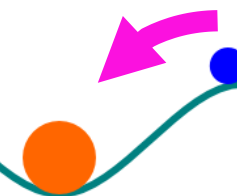
なにもないトランポリンは平ら



ボールを置くと  
トランポリンが歪む

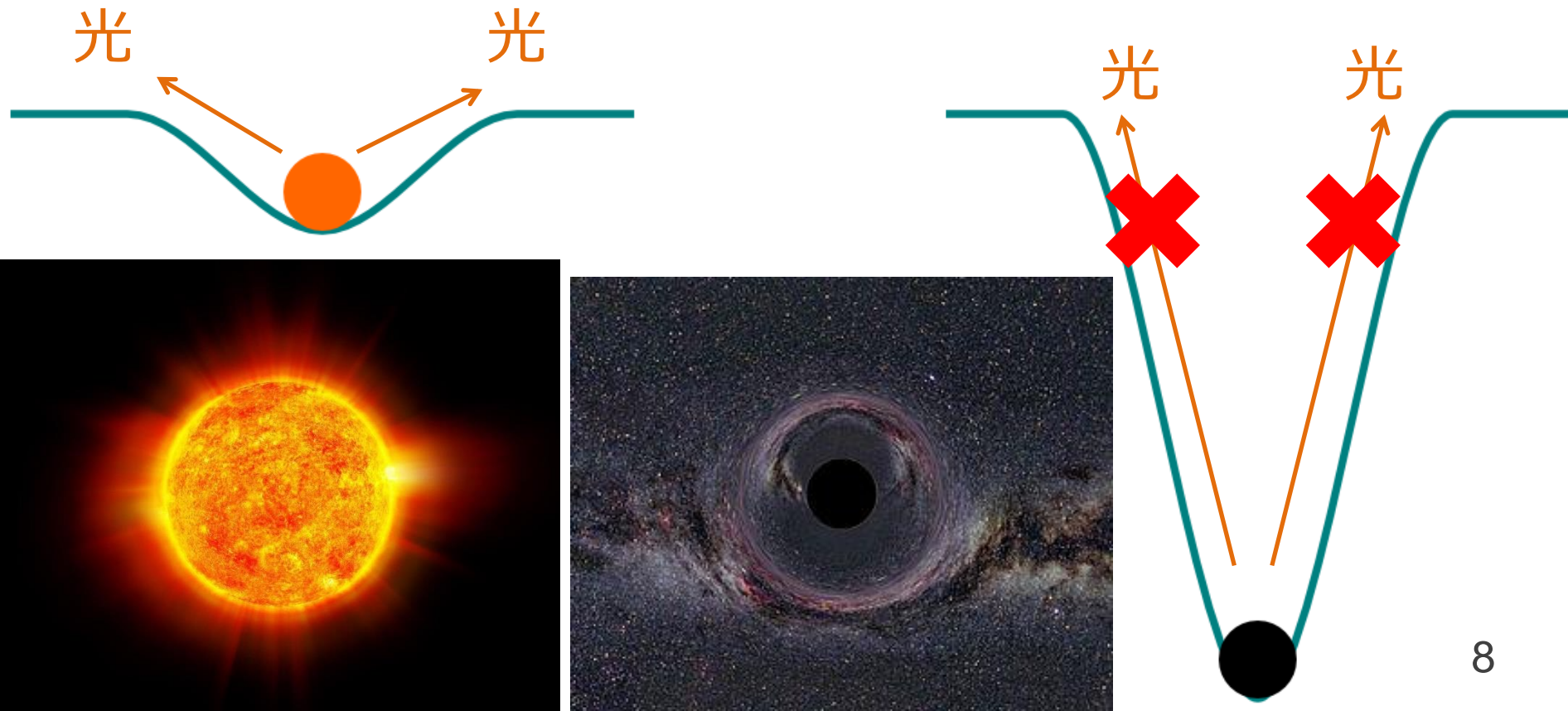


近くのボールは  
歪みに沿って引き寄せられる



# ブラックホール

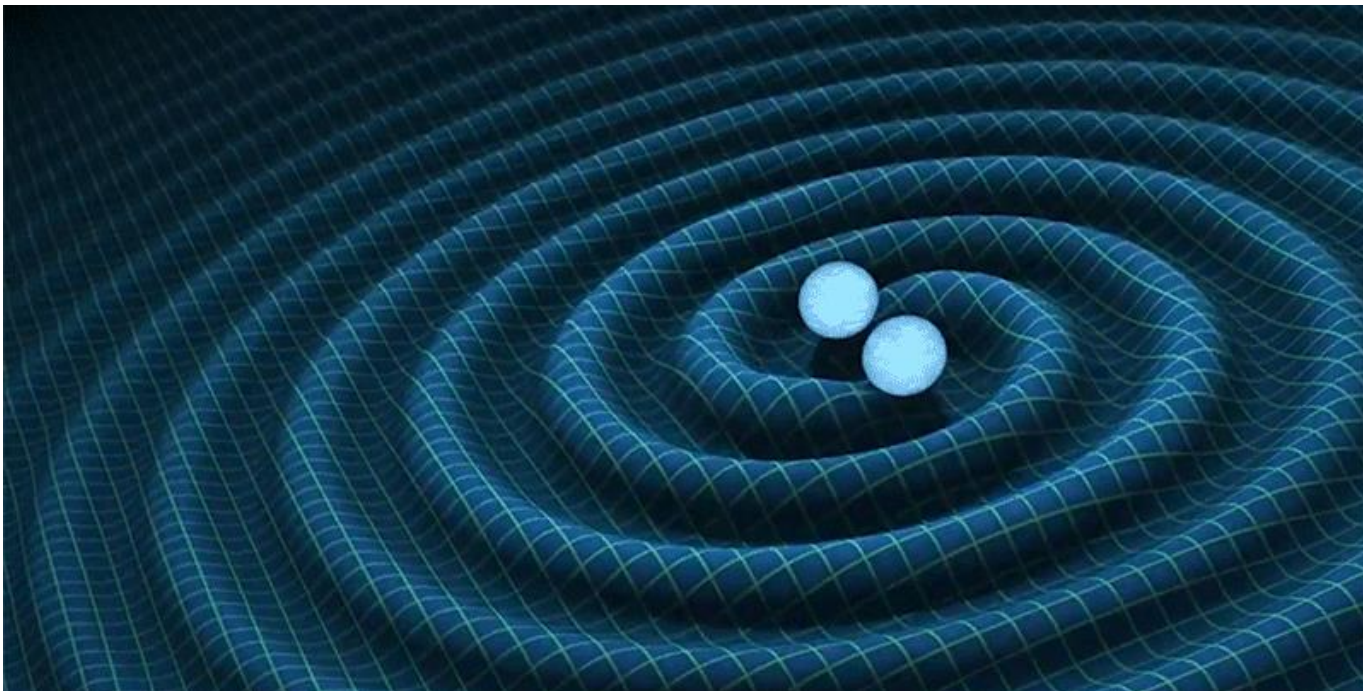
- 極端に小さく重い天体
- 空間が歪みすぎて光も何も脱出できない  
光で見ることができない天体





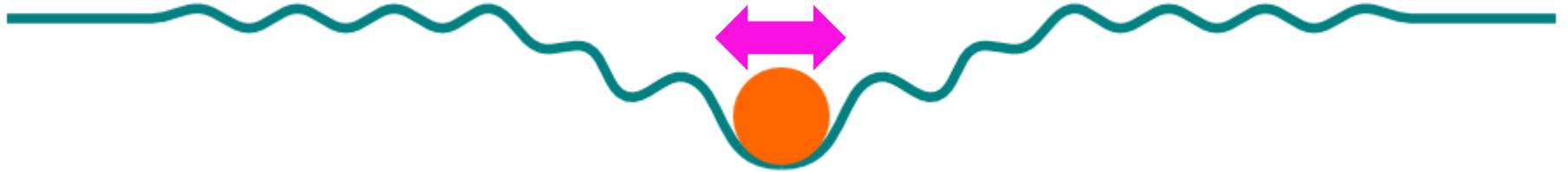
# 重力波は「時空のさざ波」

- 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」

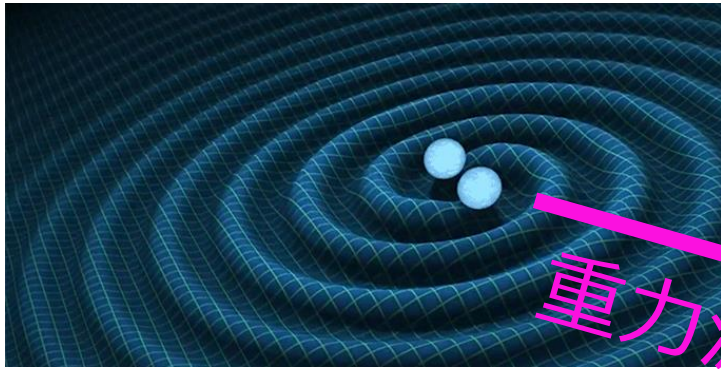
- 物体が動くと空間の歪みが変化し、光の速さで伝搬する → これが重力波



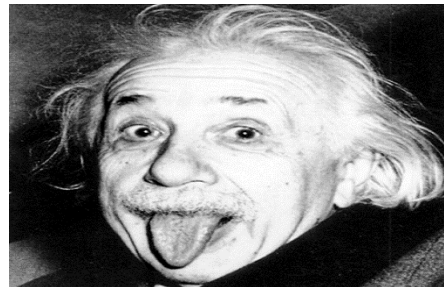
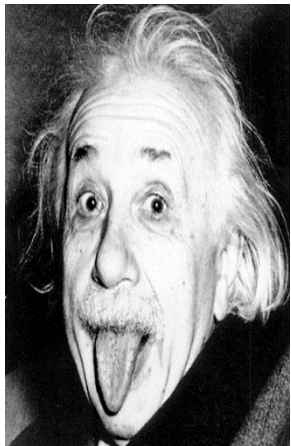
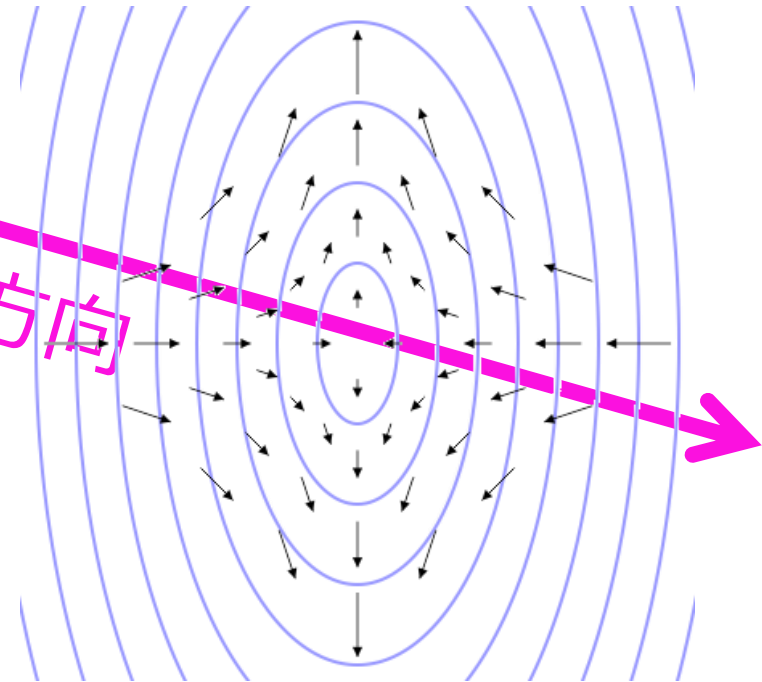
水の波紋  
に似ている

# 重力波の特徴

- 縦方向が伸びると、横方向が縮む
- 何にもさえぎられない



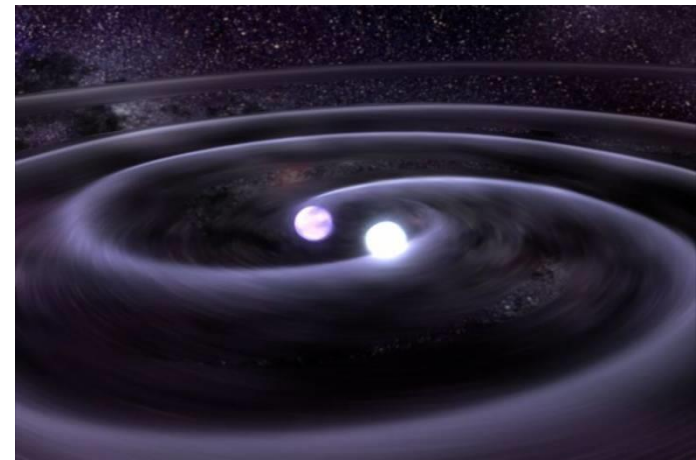
重力波の伝わる方向



# 重力波源となり得る天体現象

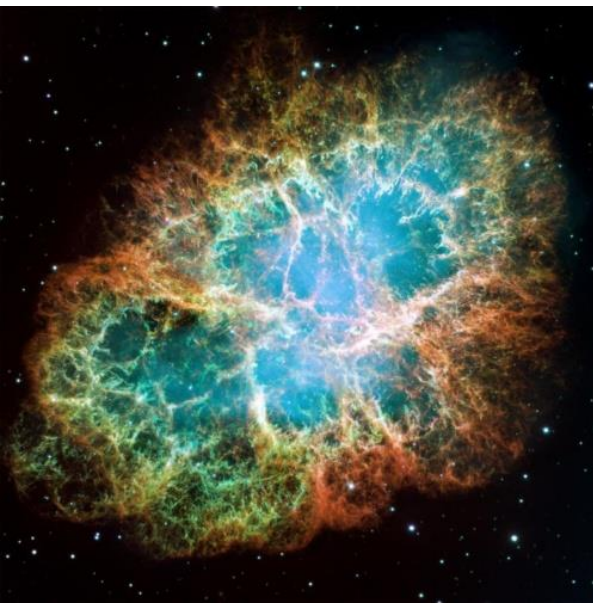


パルサー

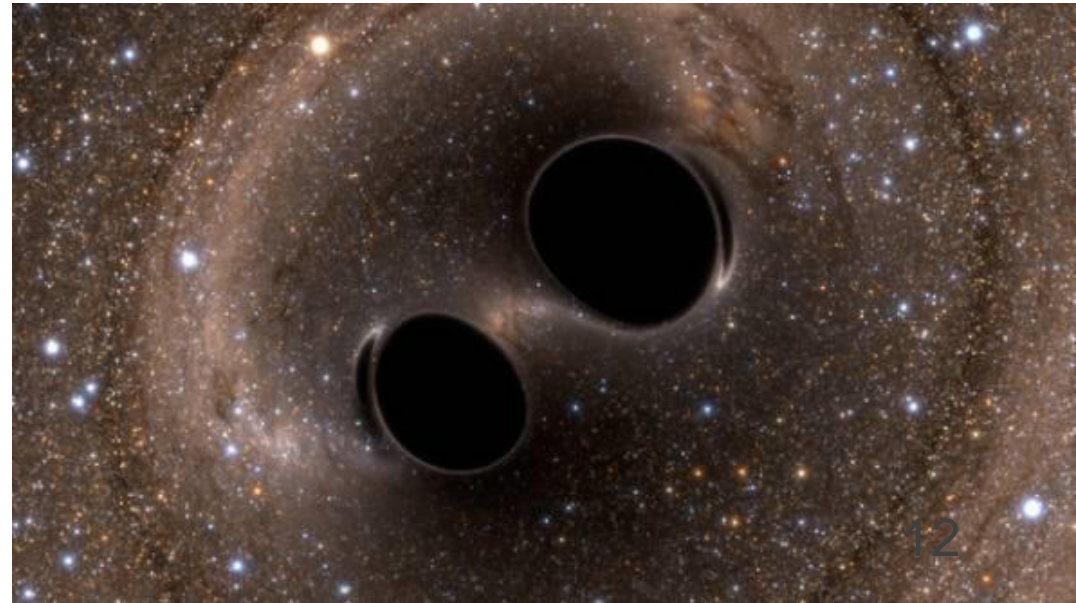


中性子星連星

超新星爆発



ブラックホール連星



# 重力波で何がわかる？

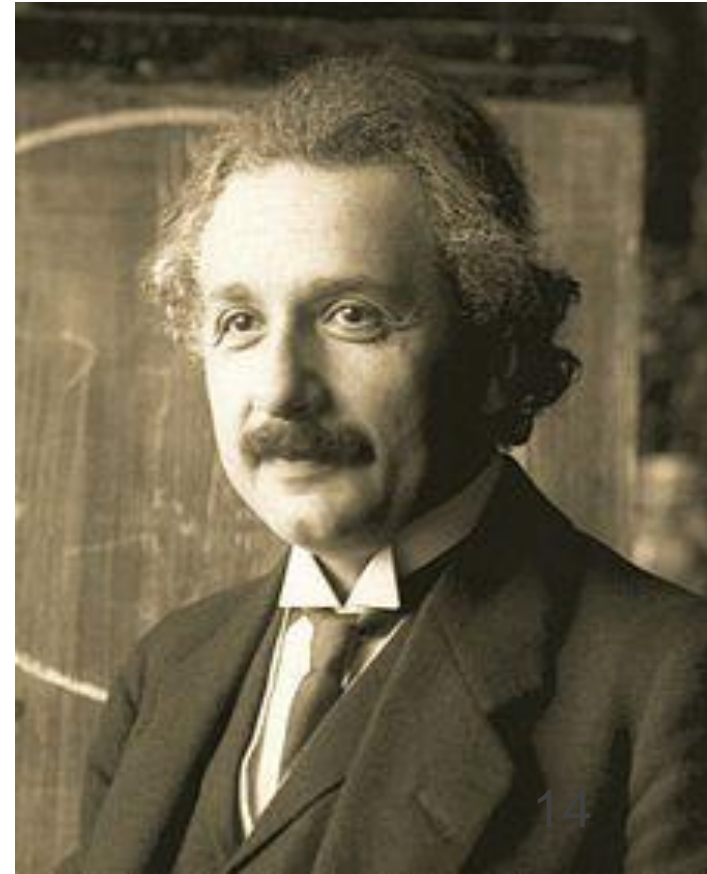
- **星の中**を探ることができる  
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる  
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

エコー写真(音波)でお腹  
の中が見えるように



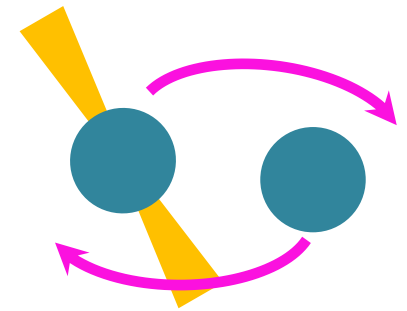
# 最初は受け入れられなかった重力波

- 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を予言
- 1936年 アインシュタイン「誤りであった」  
→ 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



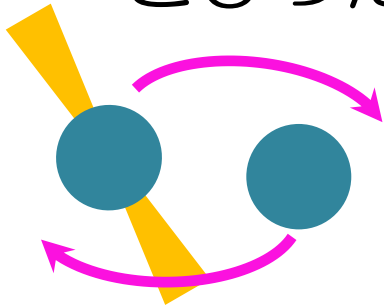
# 重力波の間接的証拠

- 1974年 ラッセル・ハルスとジョゼフ・テイラーが連星パルサーを発見

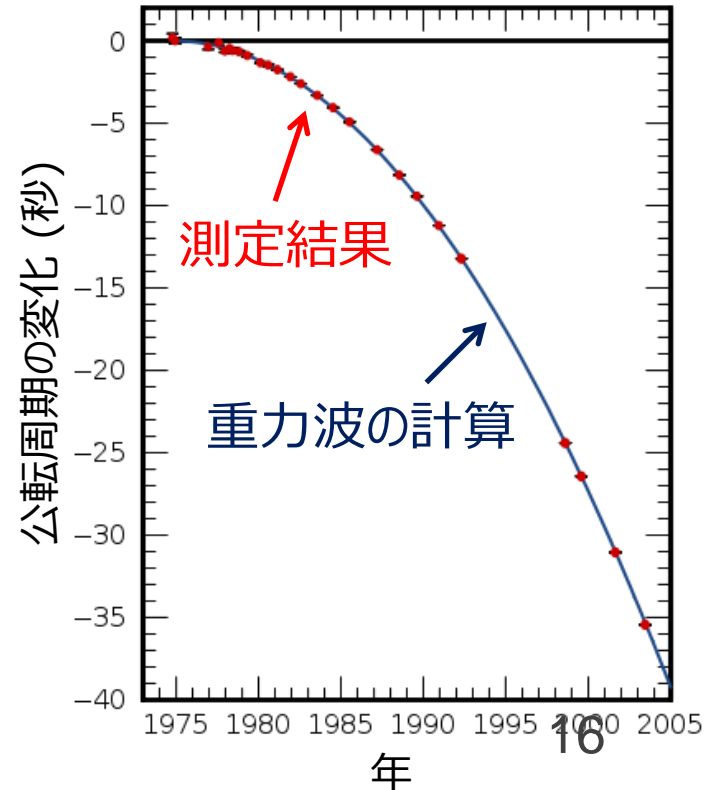
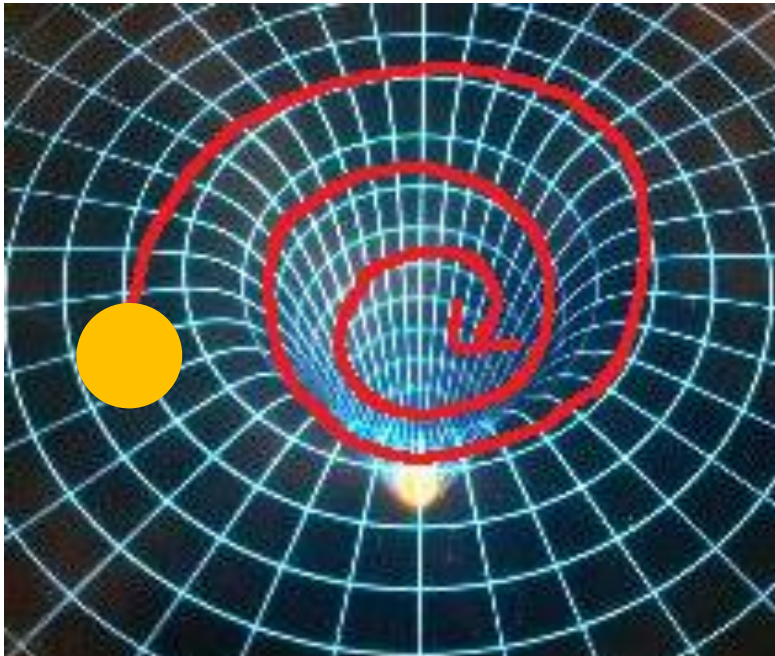


# 重力波の間接的証拠

- 軌道半径の減少が重力波によるエネルギー損失計算とぴったり一致



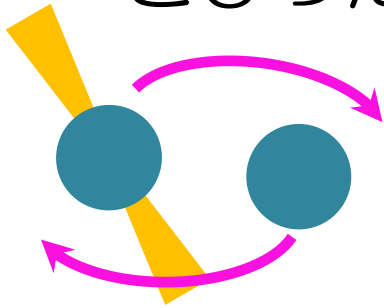
1993年ノーベル賞



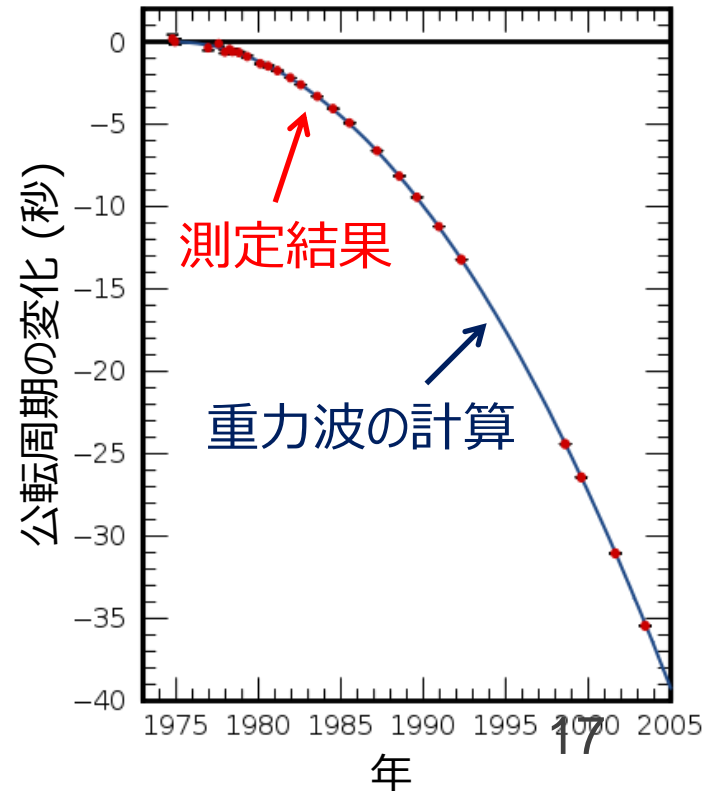


# 重力波の間接的証拠

- 軌道半径の減少が重力波によるエネルギー損失計算とぴったり一致



1993年ノーベル賞



# 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

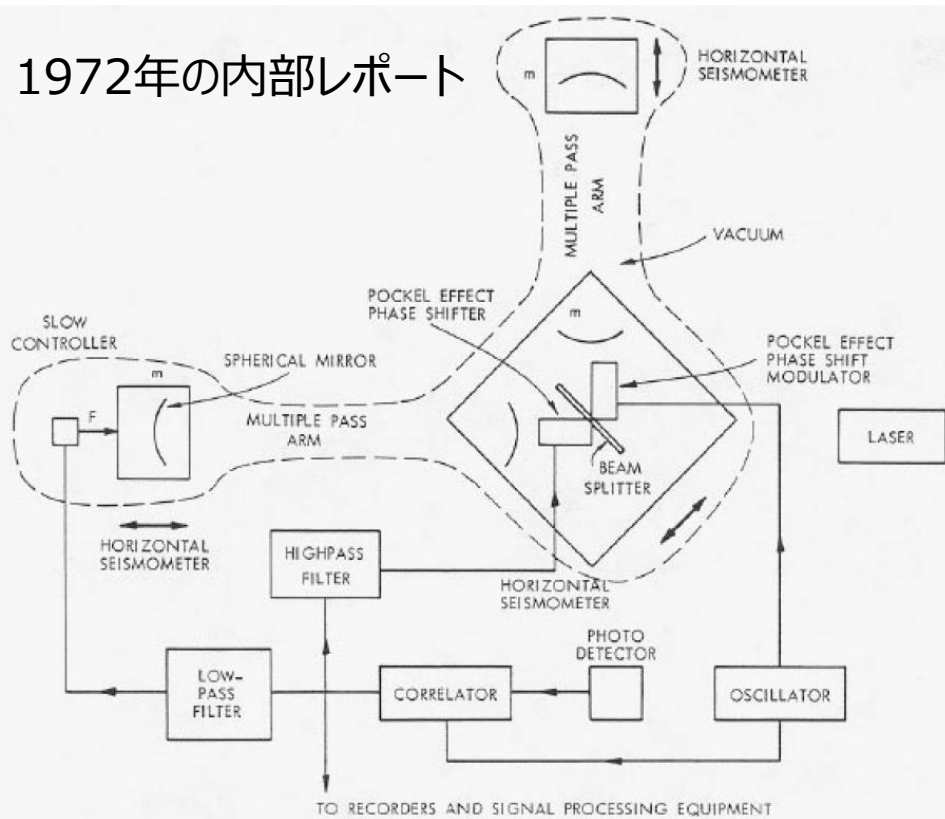
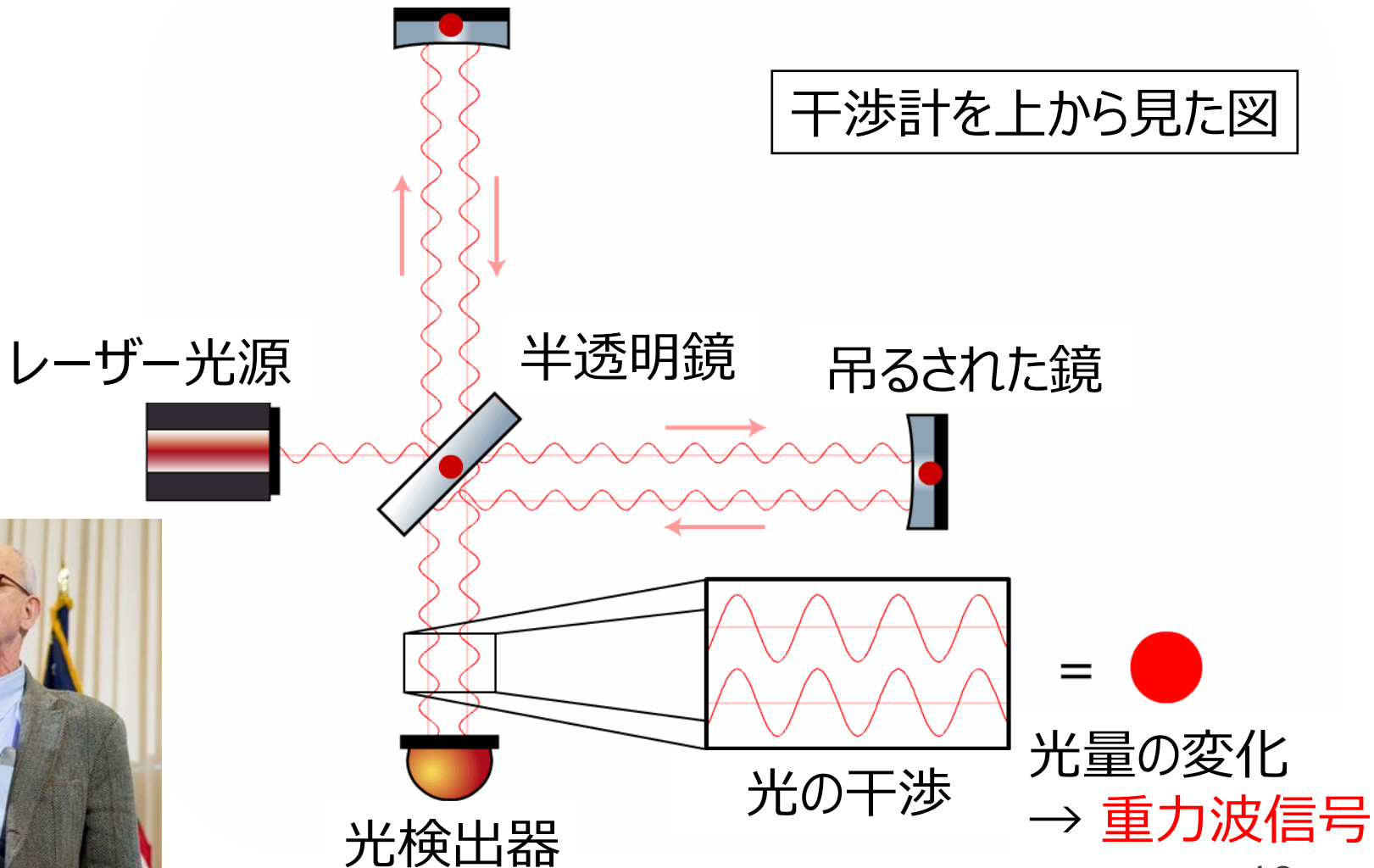


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



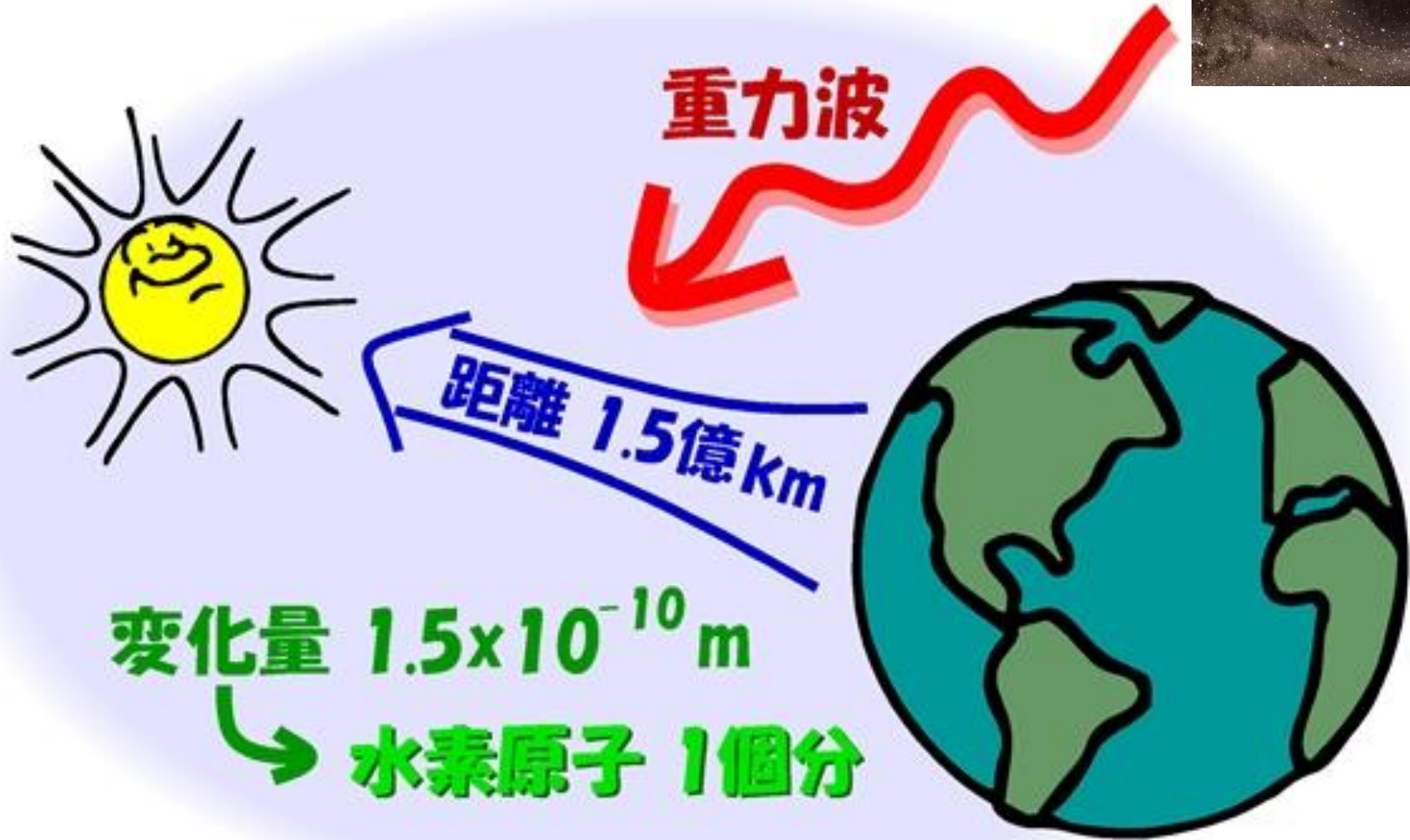
# レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



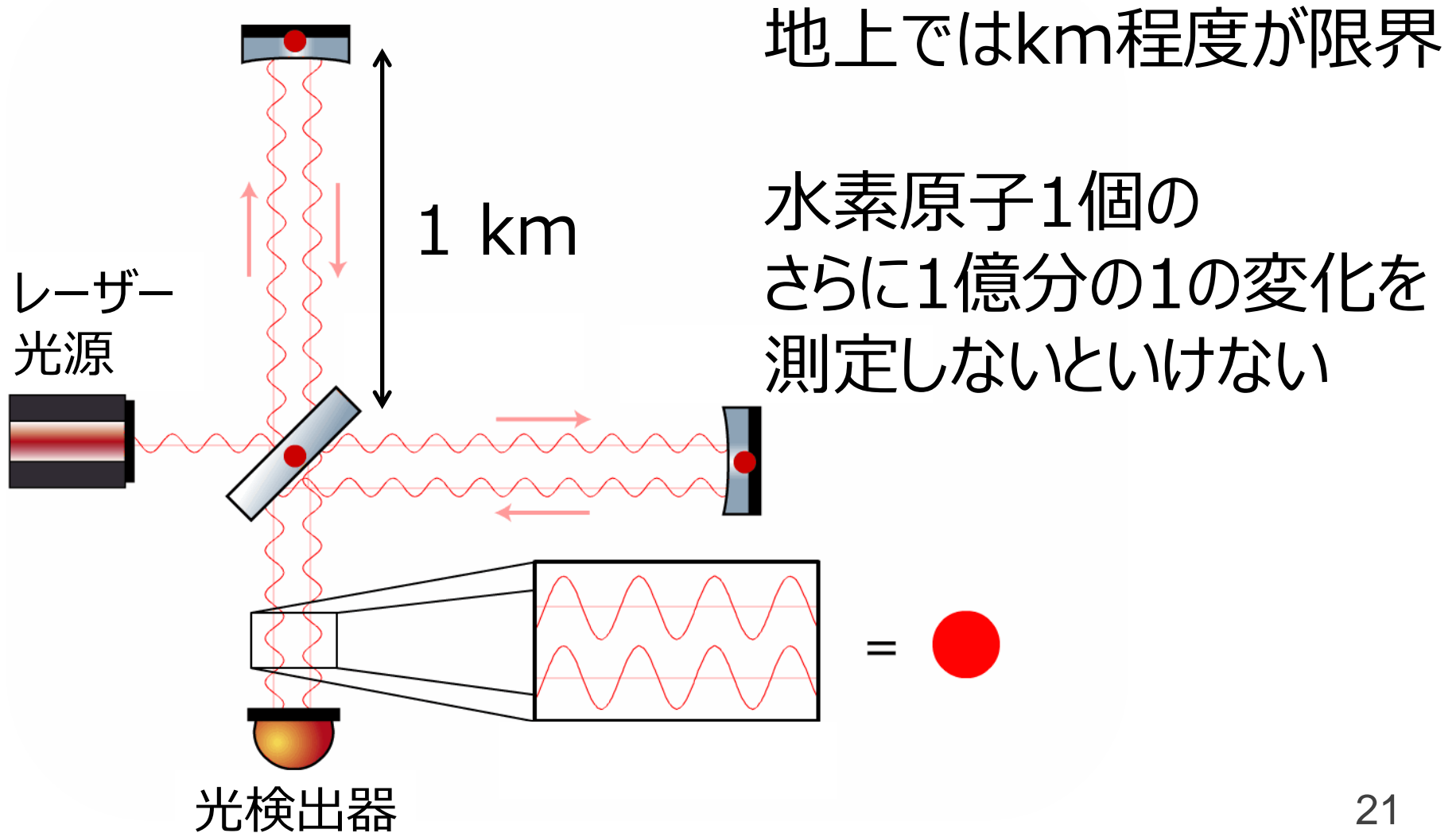
# 重力波の振幅はどれくらい？

- 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)



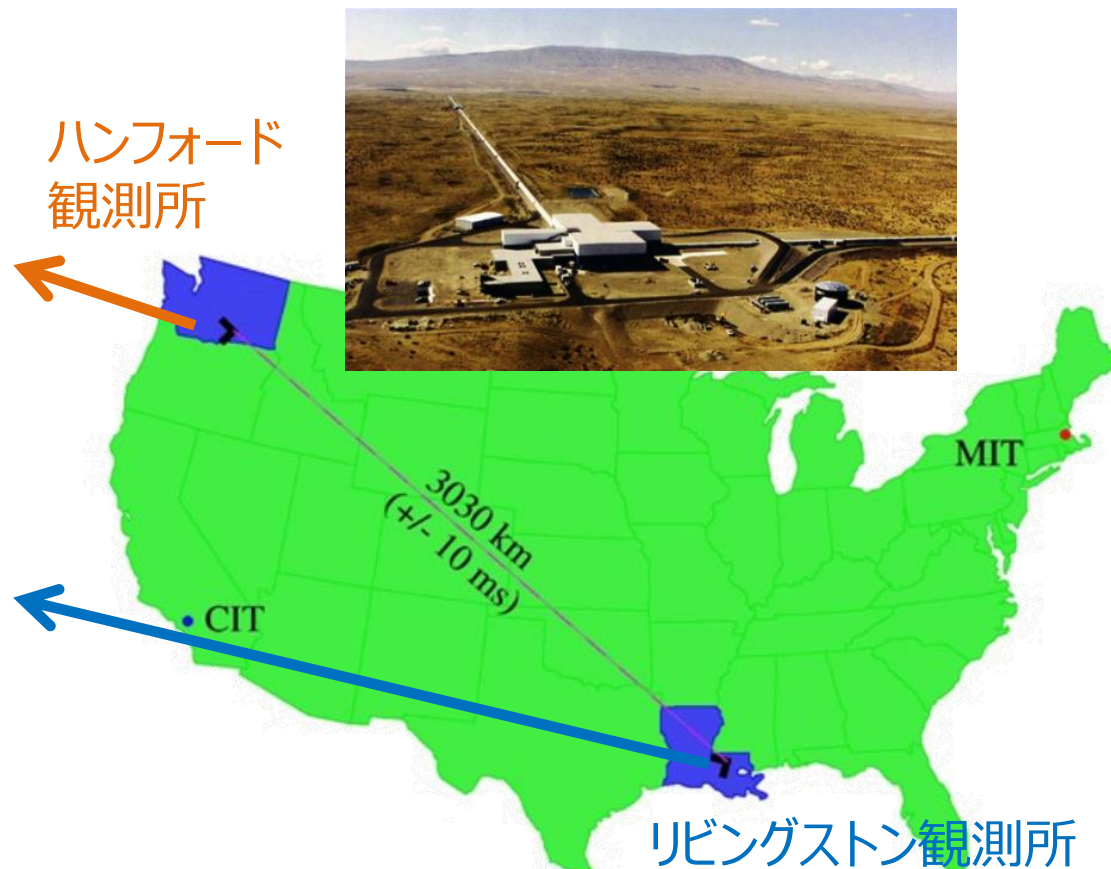
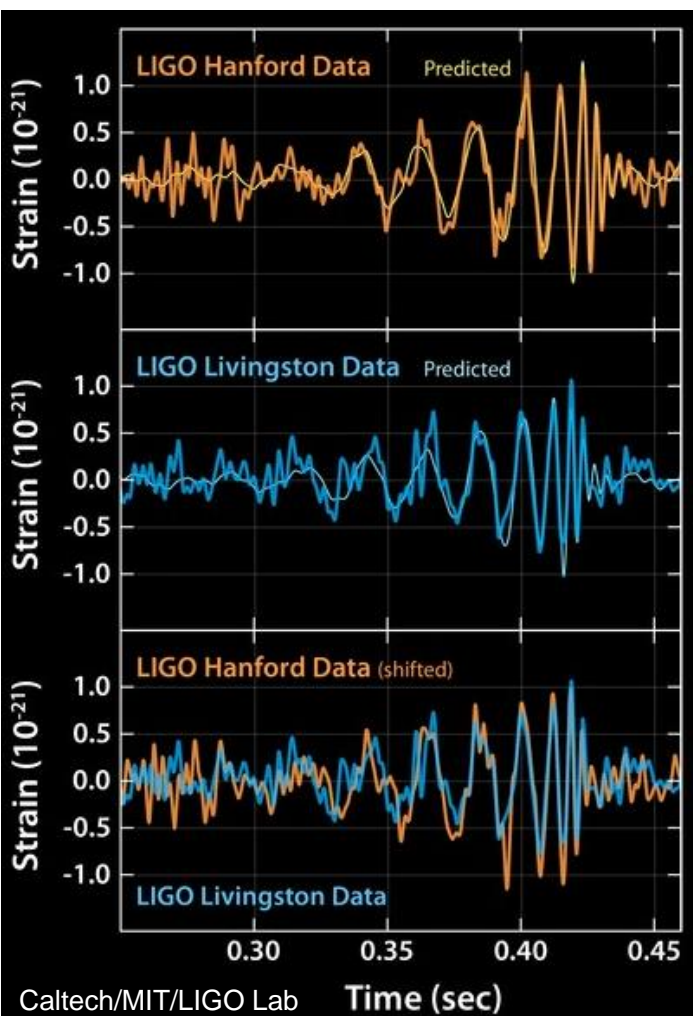
# 重力波直接検出までの歴史

- 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**
- 1974年 ハルス・テイラーが連星パルサーを発見  
重力波の**間接的証拠**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始  
LIGO (アメリカ)、TAMA300 (日本)、  
GEO600 (ドイツ)、Virgo (イタリア)  
→ 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！**



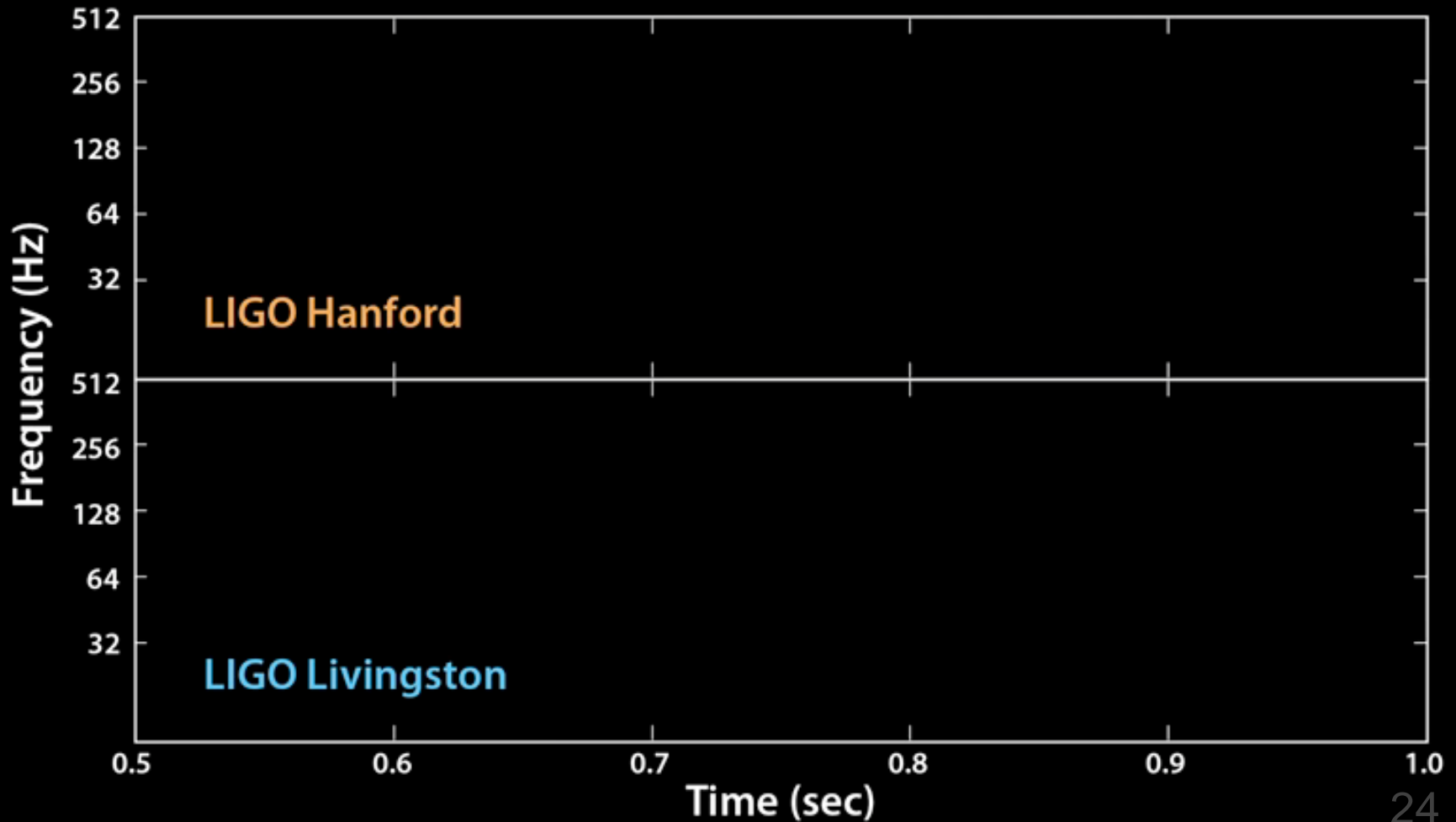
# アメリカのLIGOによる初検出

- 3000 km離れた2台の望遠鏡でほぼ同時に同じ波形を検出



# 検出した信号を音にすると？

- オリジナル→シフト→オリジナル→シフト





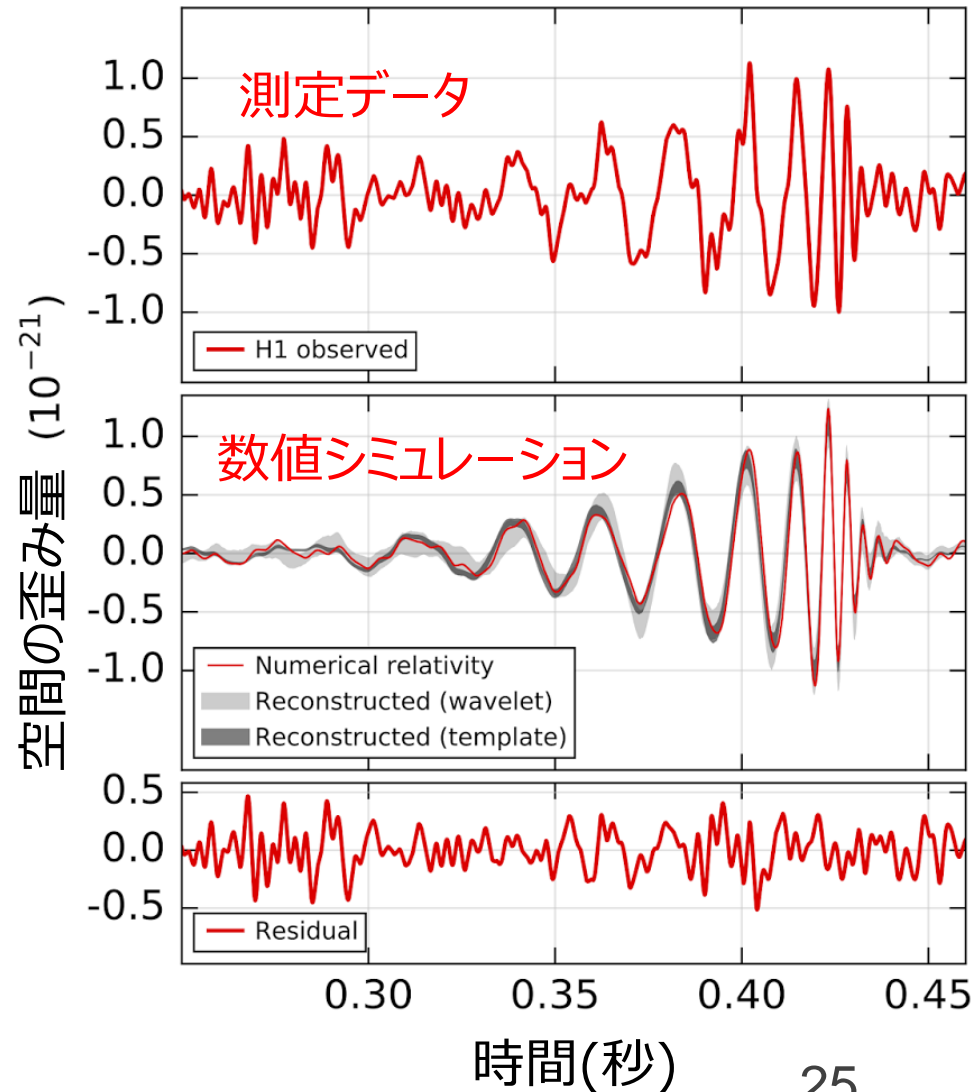
# 波形が相対論の計算とぴったり

- 教科書のような波形
- 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？

- 天体の質量と距離がわかる

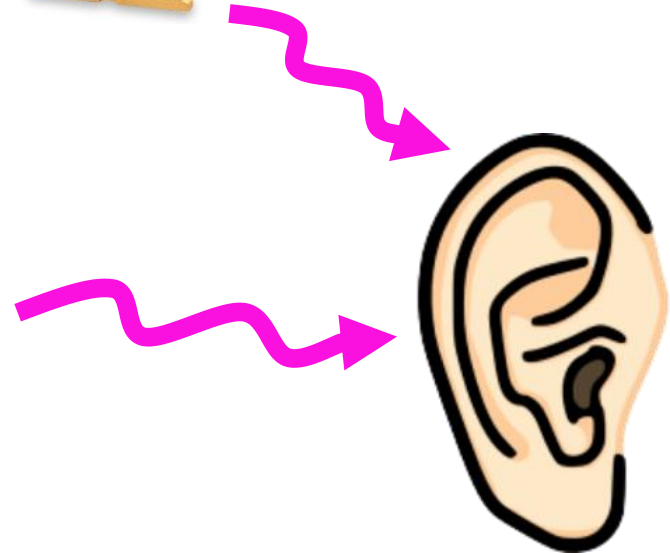
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

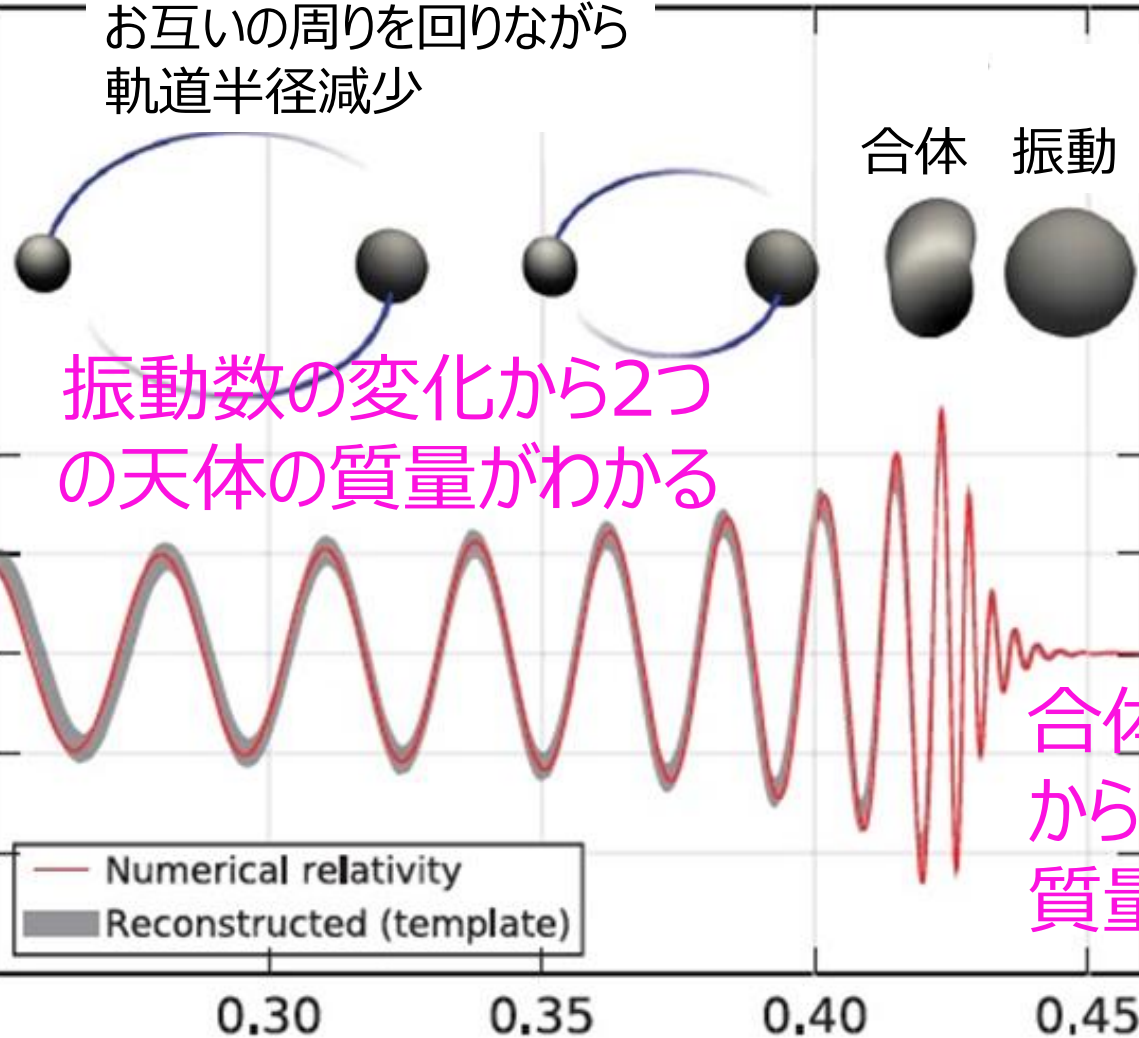


# 重力波形から何がわかるか？

- 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

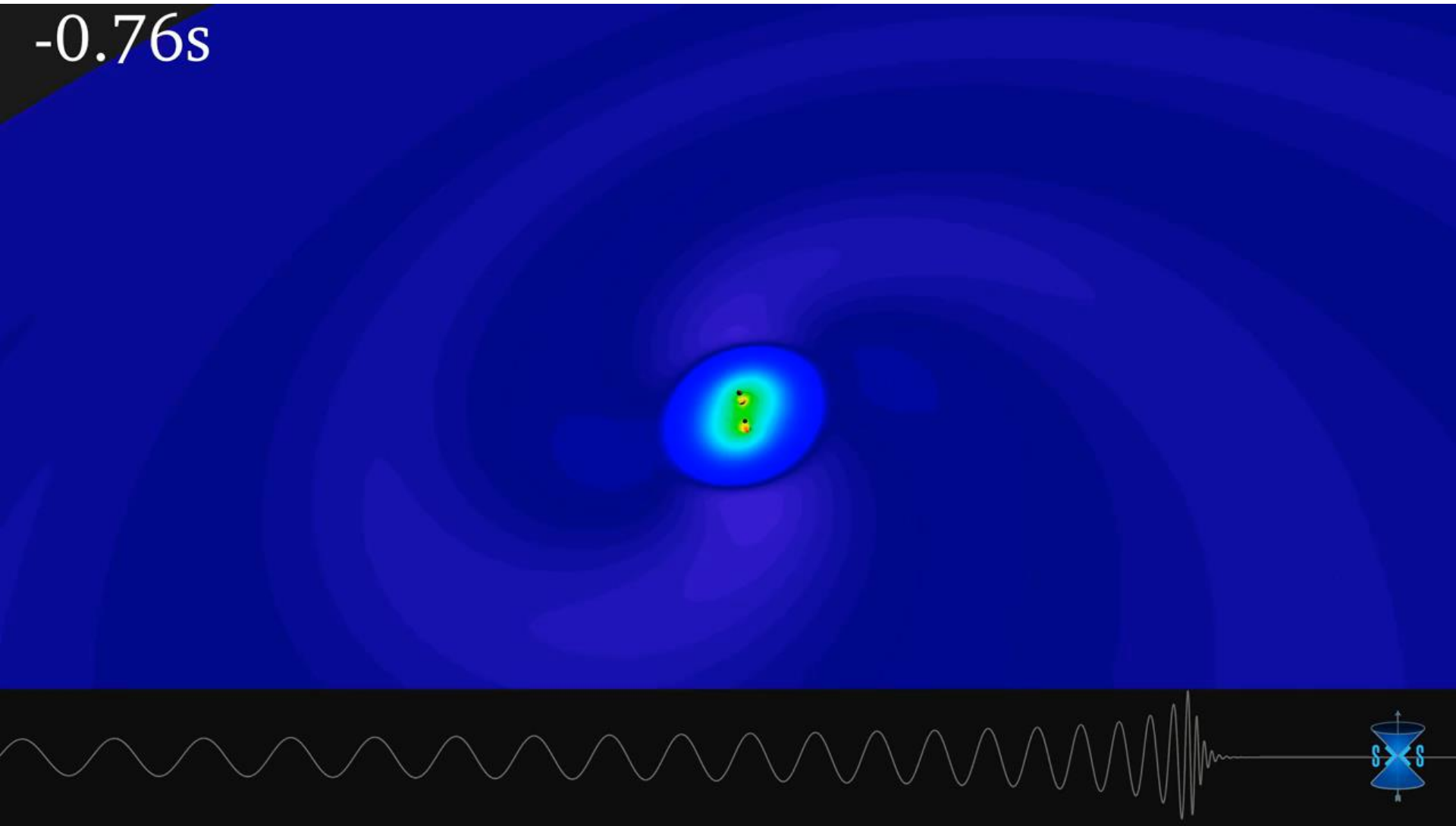
振動数の変化から2つ  
の天体の質量がわかる

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

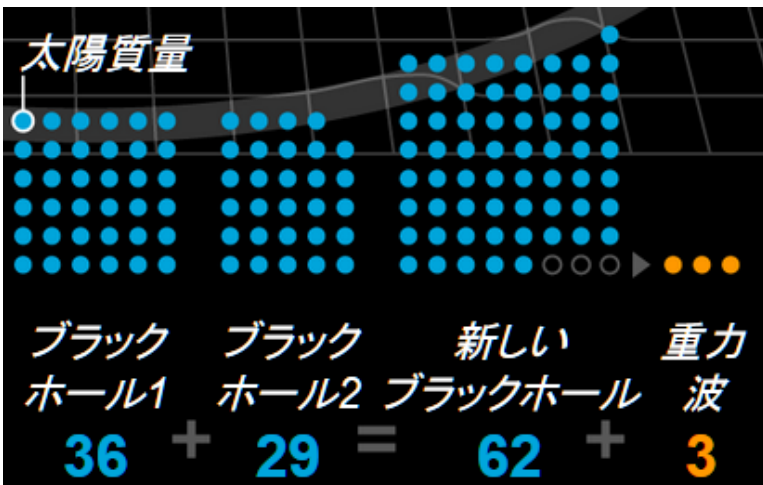


# 重力波形からわかったこと

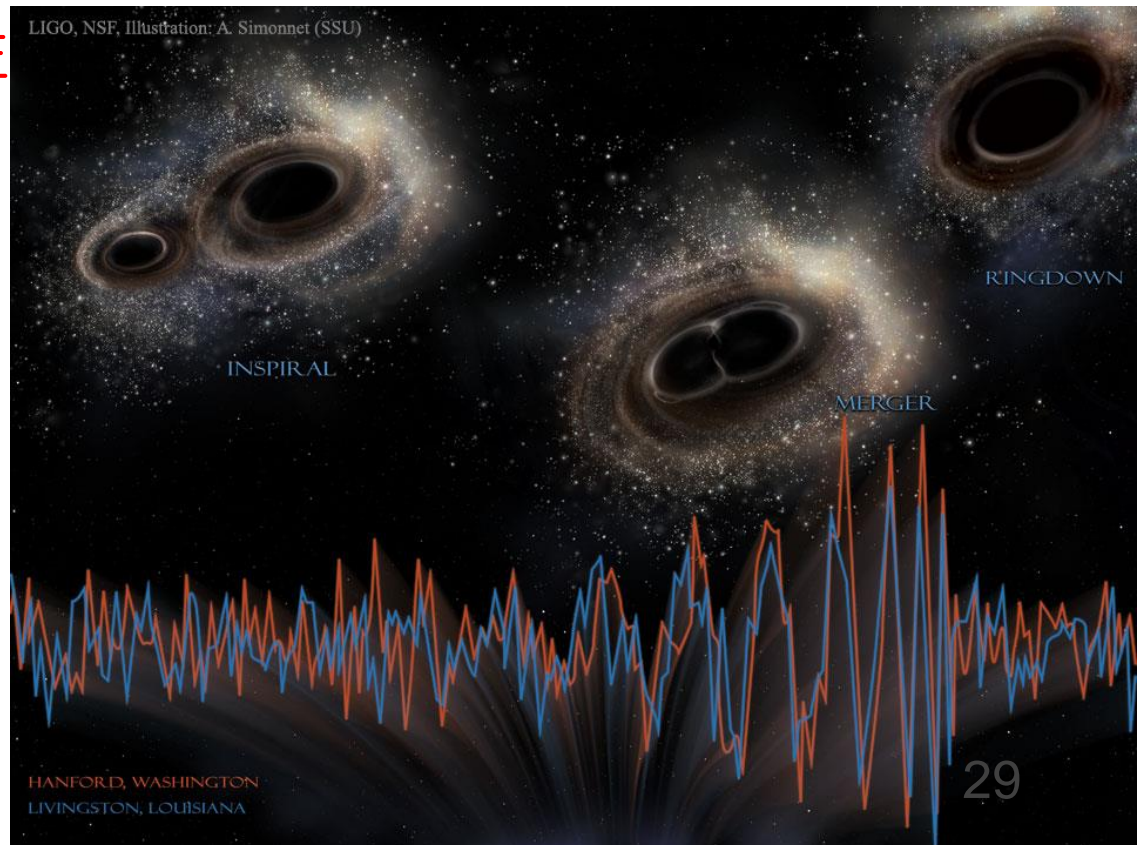
- 太陽質量の**36倍**と**29倍**が合体して**62倍**に  
→ **ブラックホール**と判明
- 太陽質量の3倍相当のエネルギーが重力波として放出
- 地球から**13億光年**

エネルギー 質量

$$E = mc^2$$



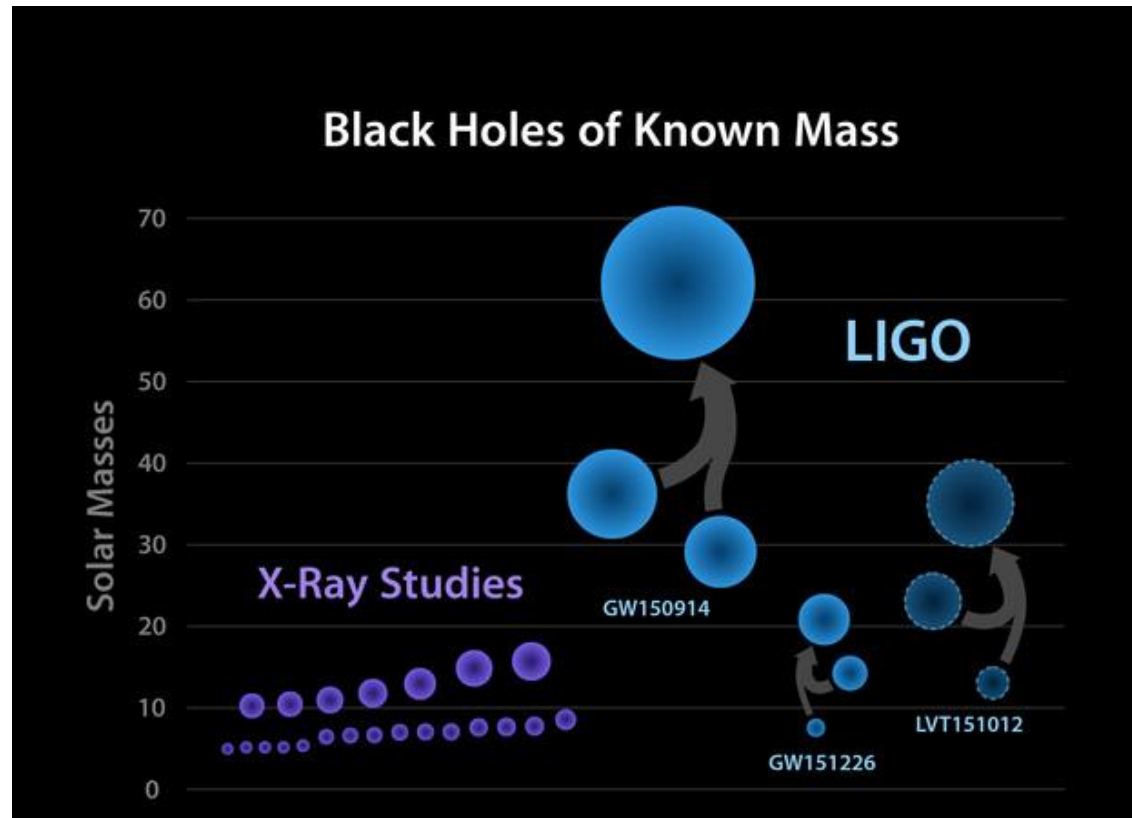
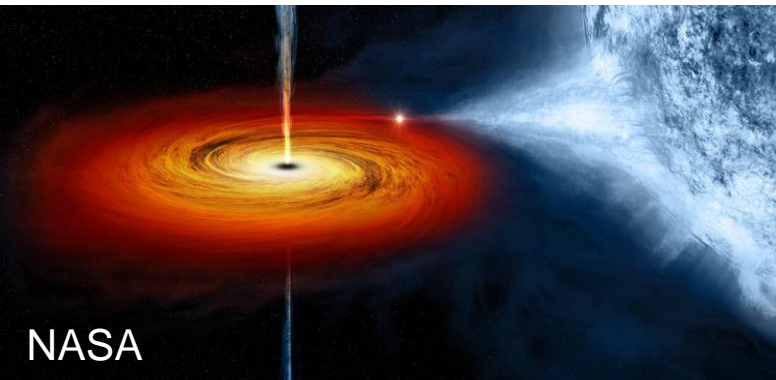
NATIONAL GRAPHIC



# ブラックホール質量の謎

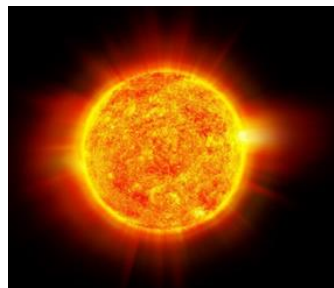
- これまでX線の観測で見つかったブラックホールは高々10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか?

伴星があるとX線でも  
ブラックホールの存在が  
間接的にわかる

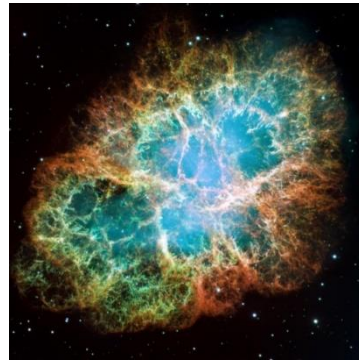


# ブラックホールはどうできる？

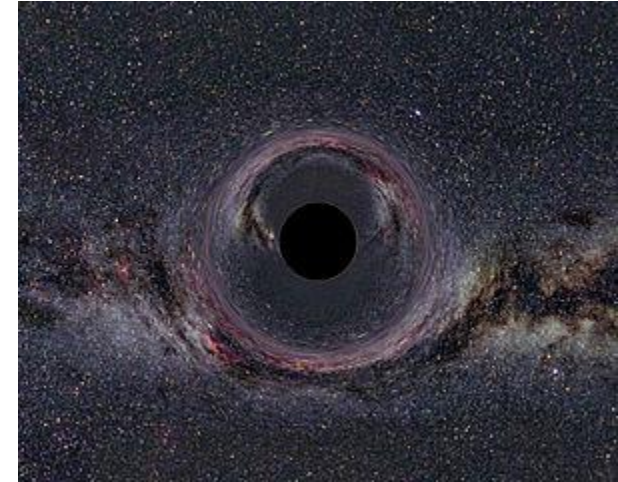
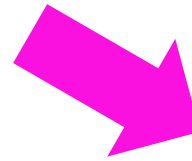
- 普通は10太陽質量程度以下の小さなブラックホールしかできない



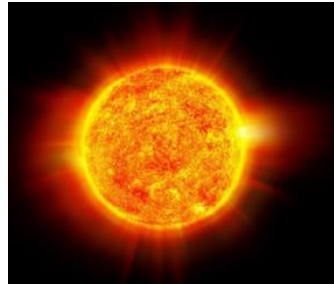
歳を取ると



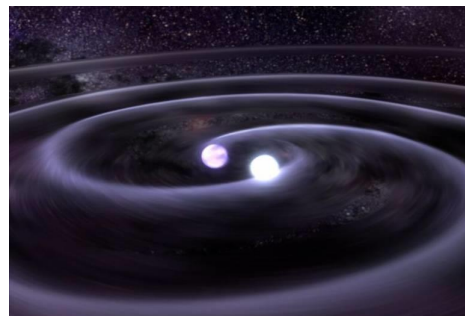
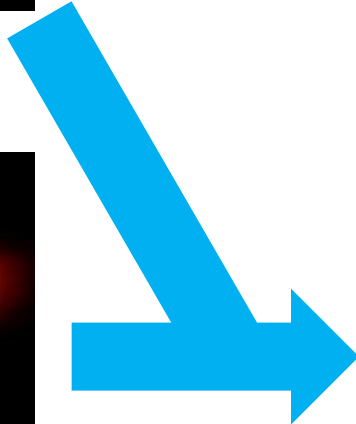
超新星爆発



10太陽質量  
程度以下の  
ブラックホール



普通の星



連星合体



# ブラックホールはどうできる？

- 銀河の中心には**巨大ブラックホール**が存在すると考えられている (100万~10億太陽質量程度)

中心にブラックホール

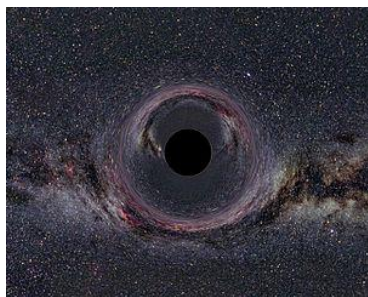


巨大ブラックホールの周りを星たちが回っている



# ブラックホールはどうできる？

- 巨大ブラックホールがどのように生まれるかはわかっていない
- 今回見つかったのは中間の質量  
→ 巨大ブラックホール形成の謎を解く鍵？



10太陽質量以下



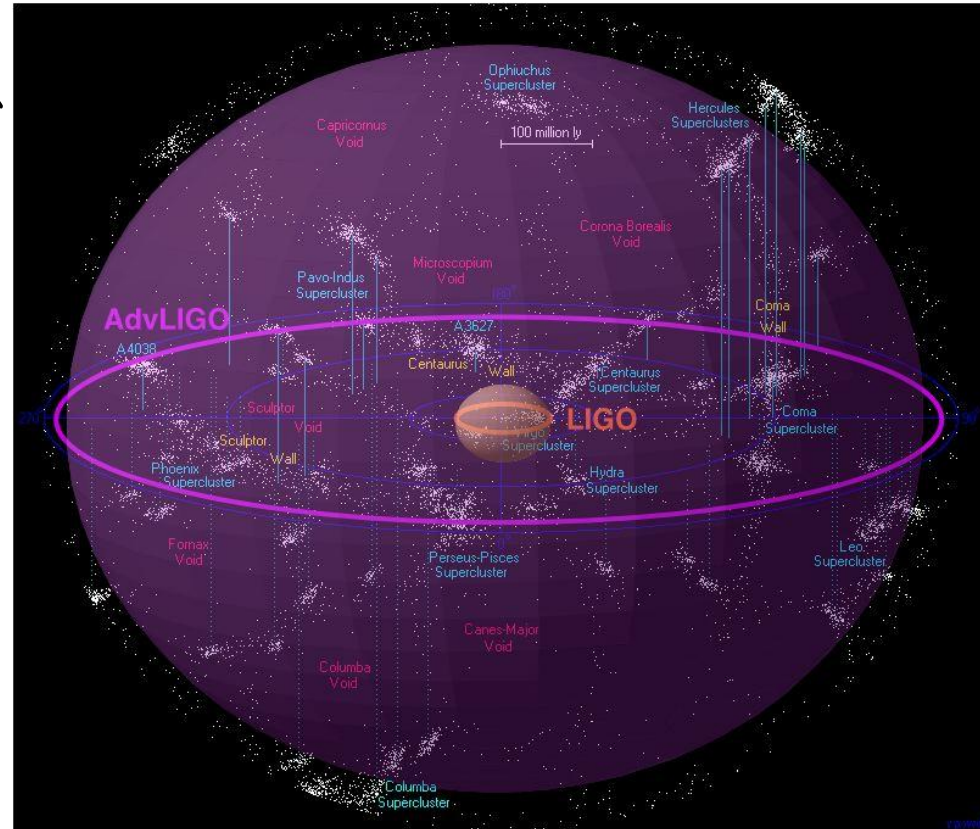
$36 + 29 \rightarrow 62$  太陽質量



巨大ブラックホール

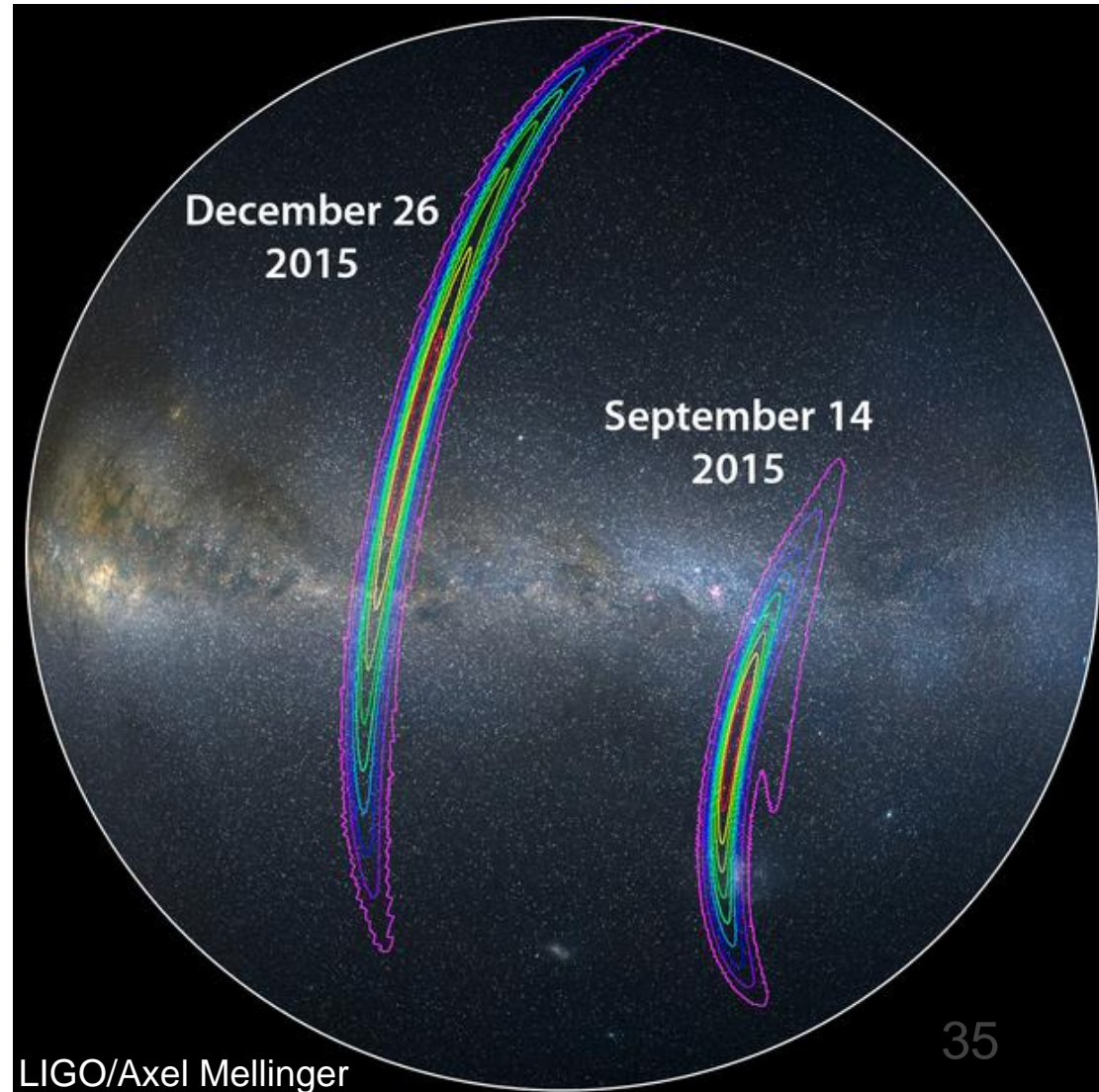
# 今後の展望

- 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、質量分布や形成率が精度よくわかる
  - 巨大ブラックホールがどうつくられるのかわかる



# 重力波はどこから来たのか

- LIGOの2台の検出器では波源があまり特定できない
- 電磁波(電波、光、X線、 $\gamma$ 線など)やニュートリノを用いた観測との比較がしにくい



# 波源の特定方法

- 検出のタイミングの差からわかる

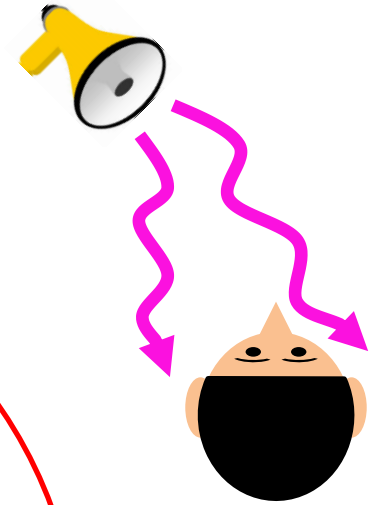
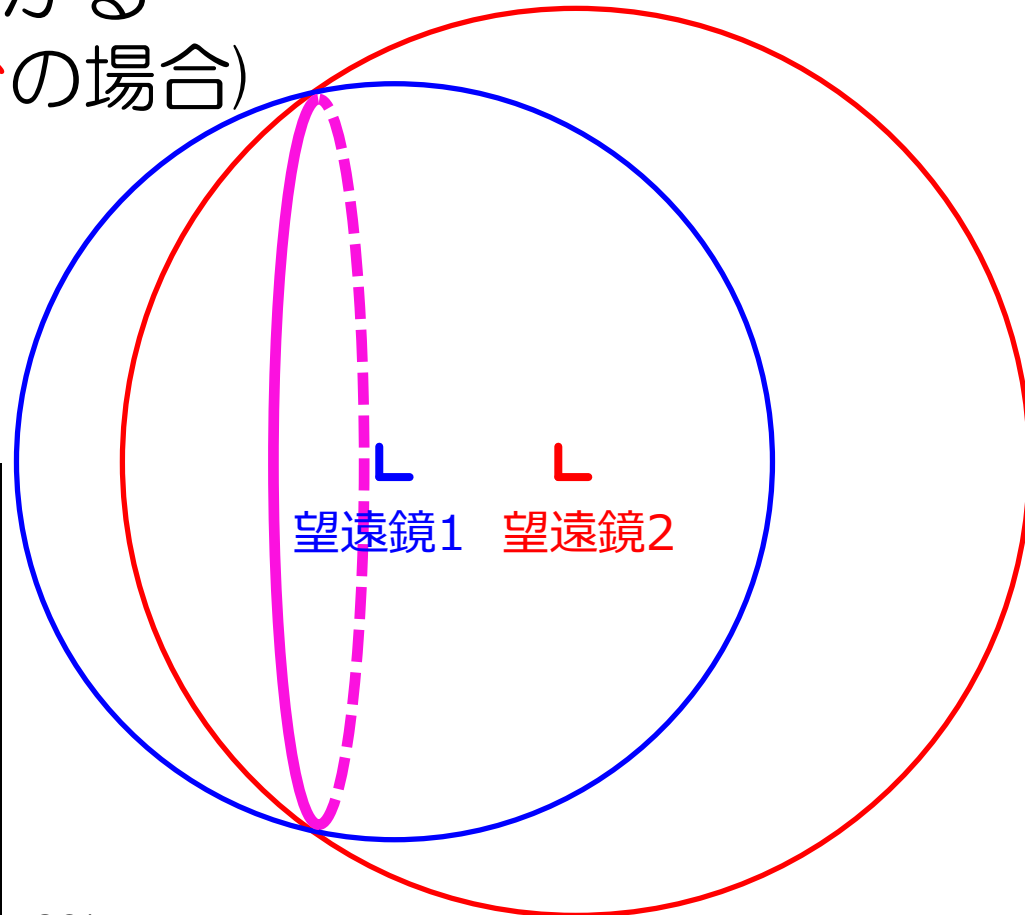


到達時刻にわずかな差が生じる

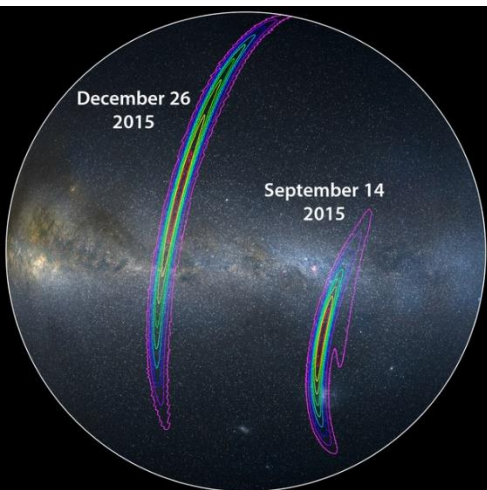
# 波源の特定方法

- 検出のタイミングの差からわかる

円周上のどこからかであることはわかる  
(望遠鏡が2台の場合)



人間の耳と同じ

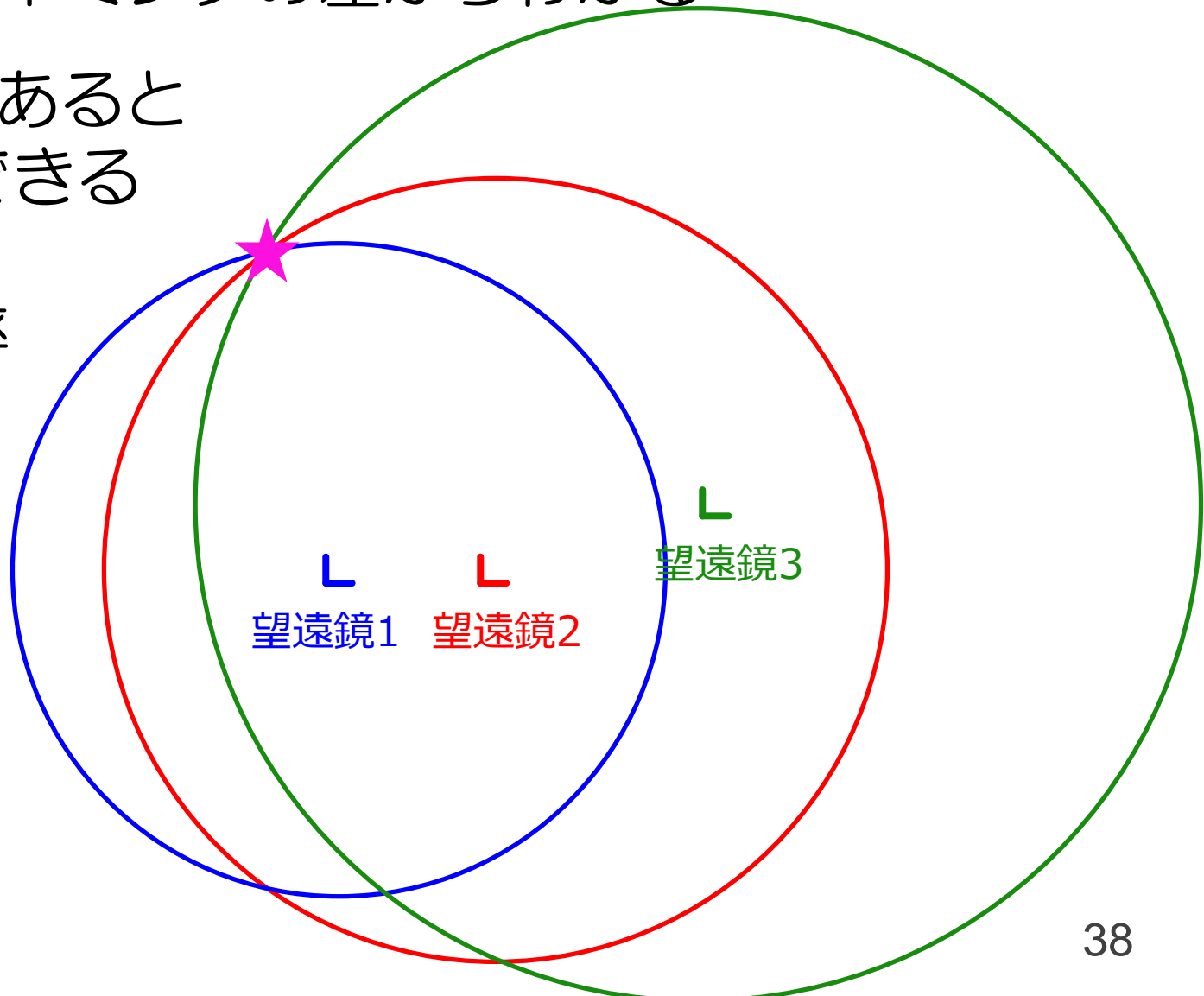


# 波源の特定方法

- 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

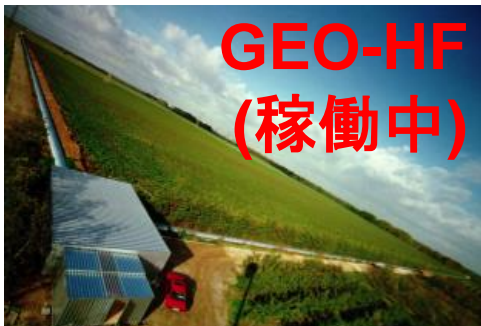
精度や稼働率  
を考えると  
さらに4台、  
5台、と  
複数台必要



# 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

**GEO-HF**  
(稼働中)



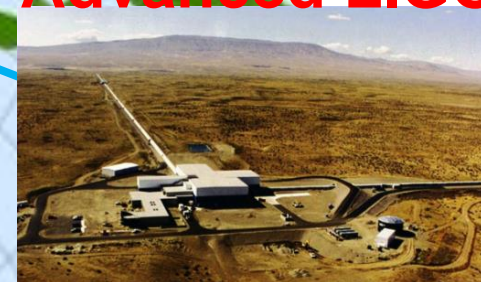
**Advanced LIGO**  
(初検出後、改良中)



**Advanced Virgo**  
(建設中)



**Advanced 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
- 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

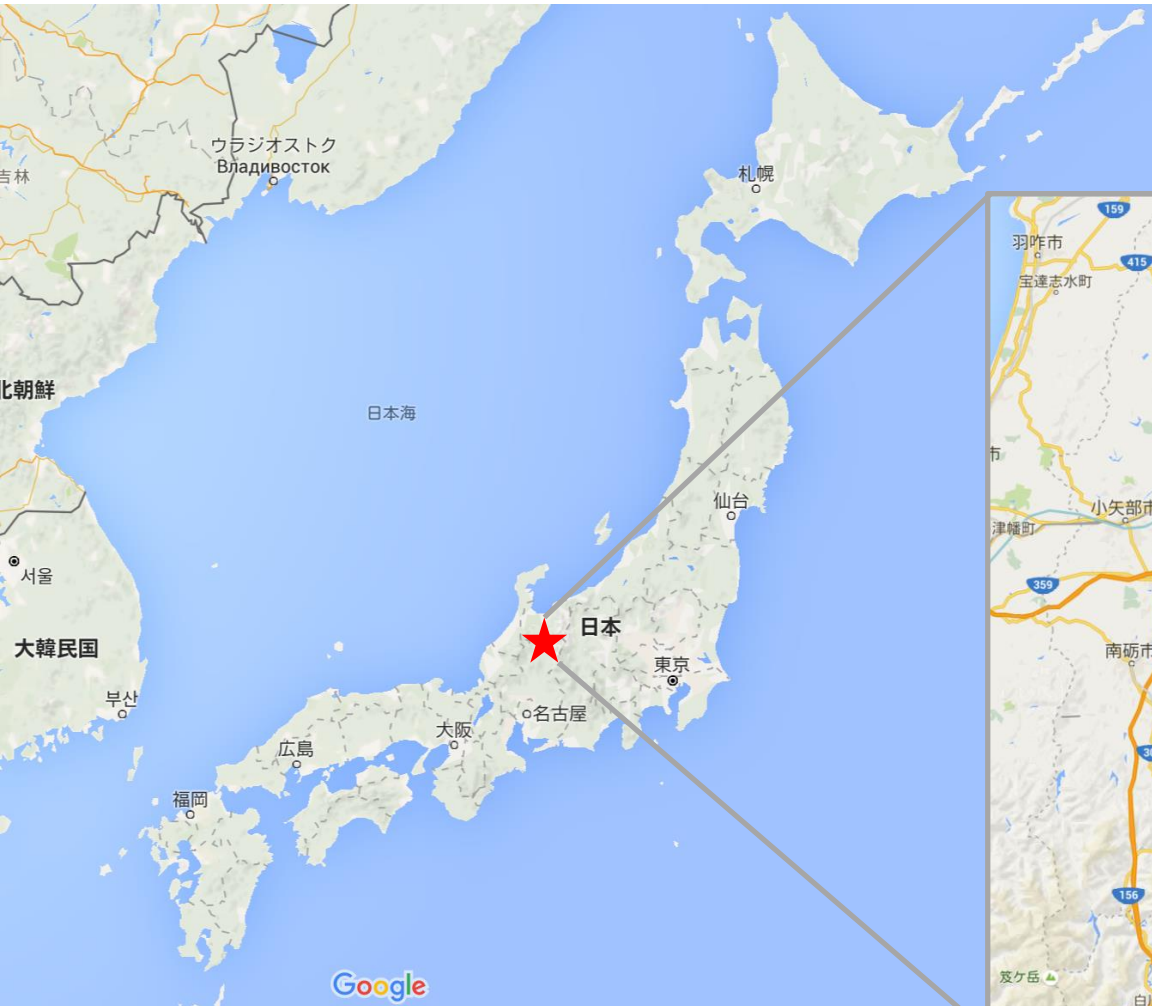


# KAGRA建設中

- 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

# 神岡の研究施設

- 池ノ山に片腕3 kmのL字型トンネル



オフィス

東茂住郵便局

Yトンネル(3 km)

XMASS(ダークマター)

池ノ山

CLIO (重力波) カムランド(ニュートリノ)

スーパーカミオカンデ (ニュートリノ)

Xトンネル(3 km)

KAGRA

国道41号線

高幡山

津島神社

大滝

Google 牧発電所

# 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



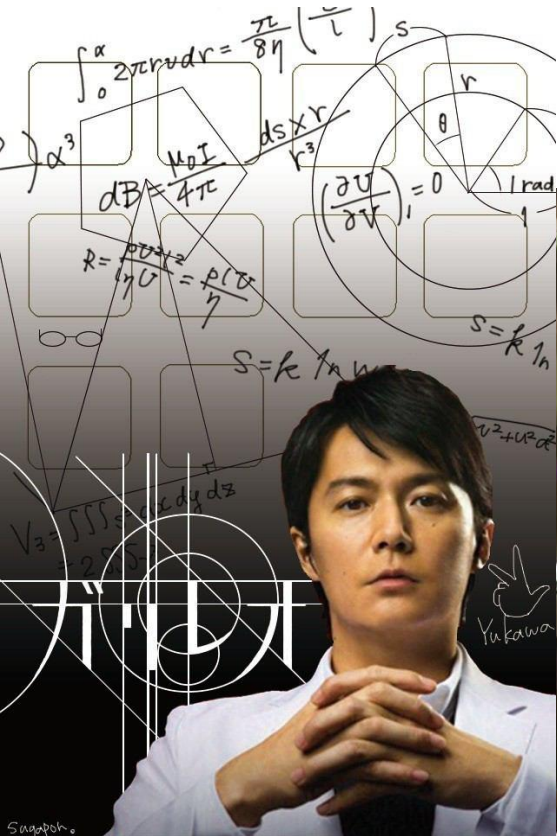
# 地下での作業

- 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

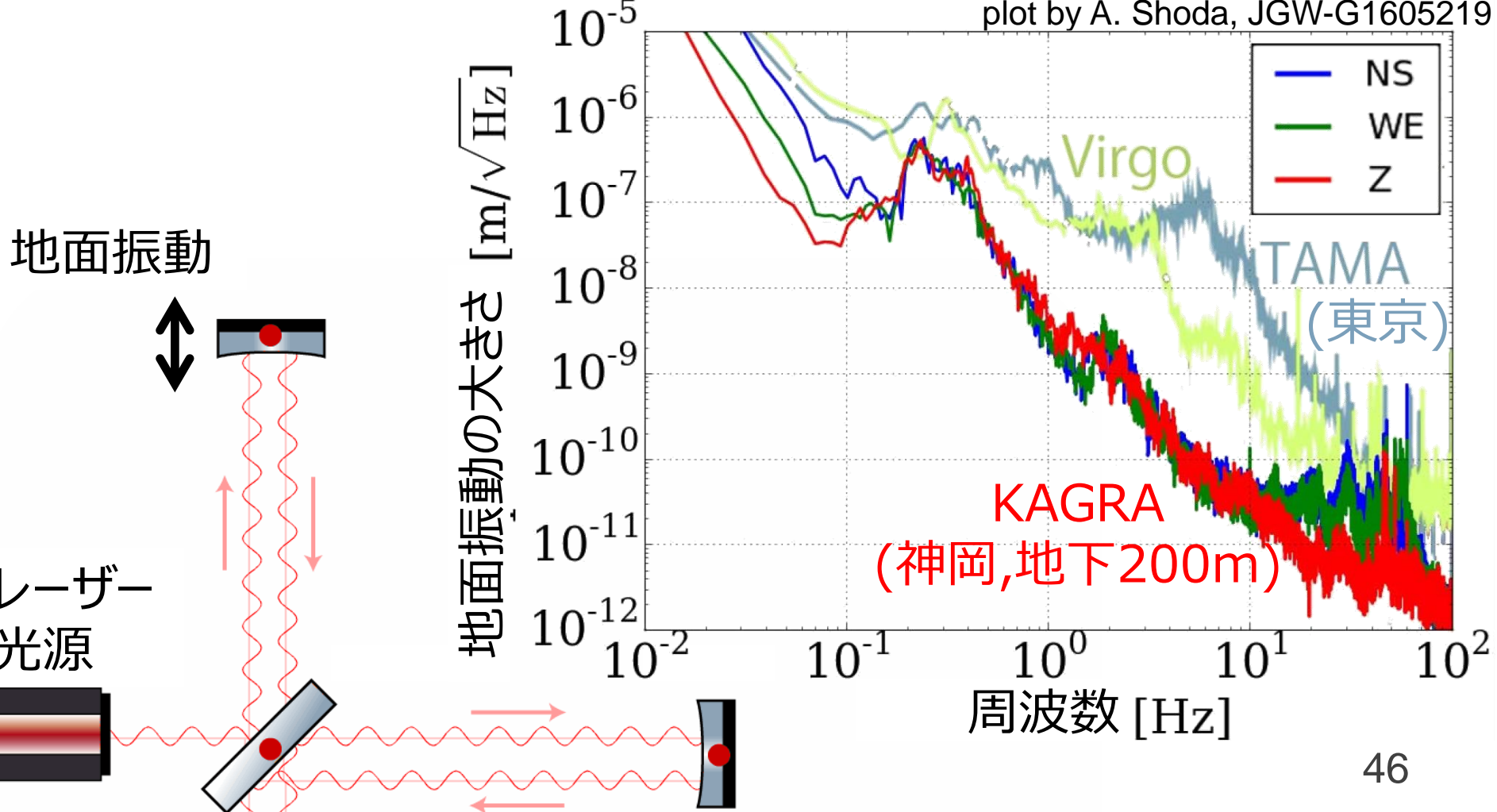
- 思ったのと違う！



# なぜ地下なののか？

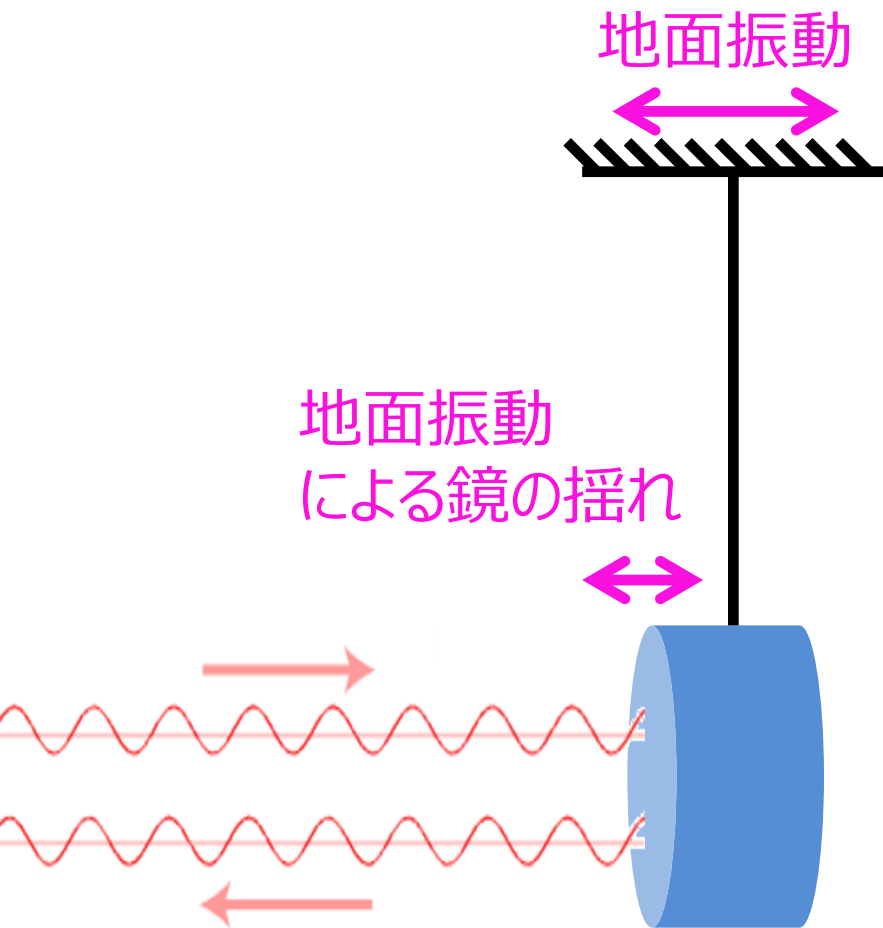
- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



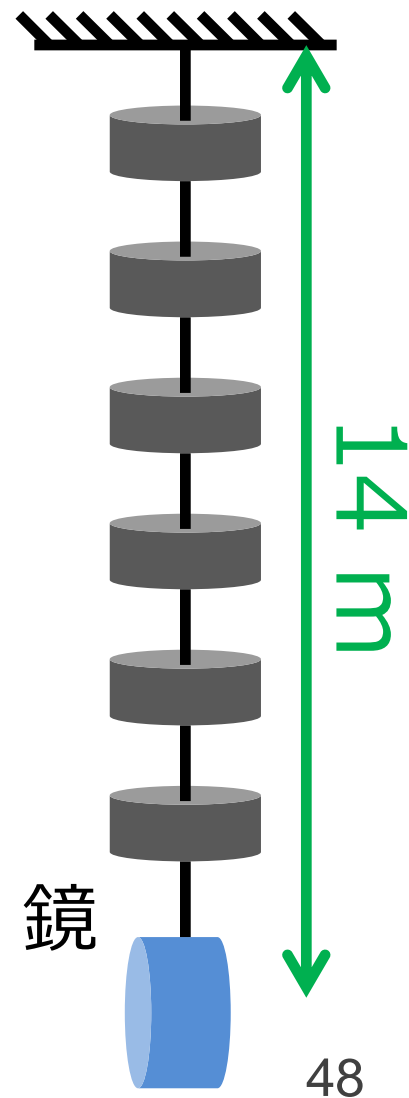
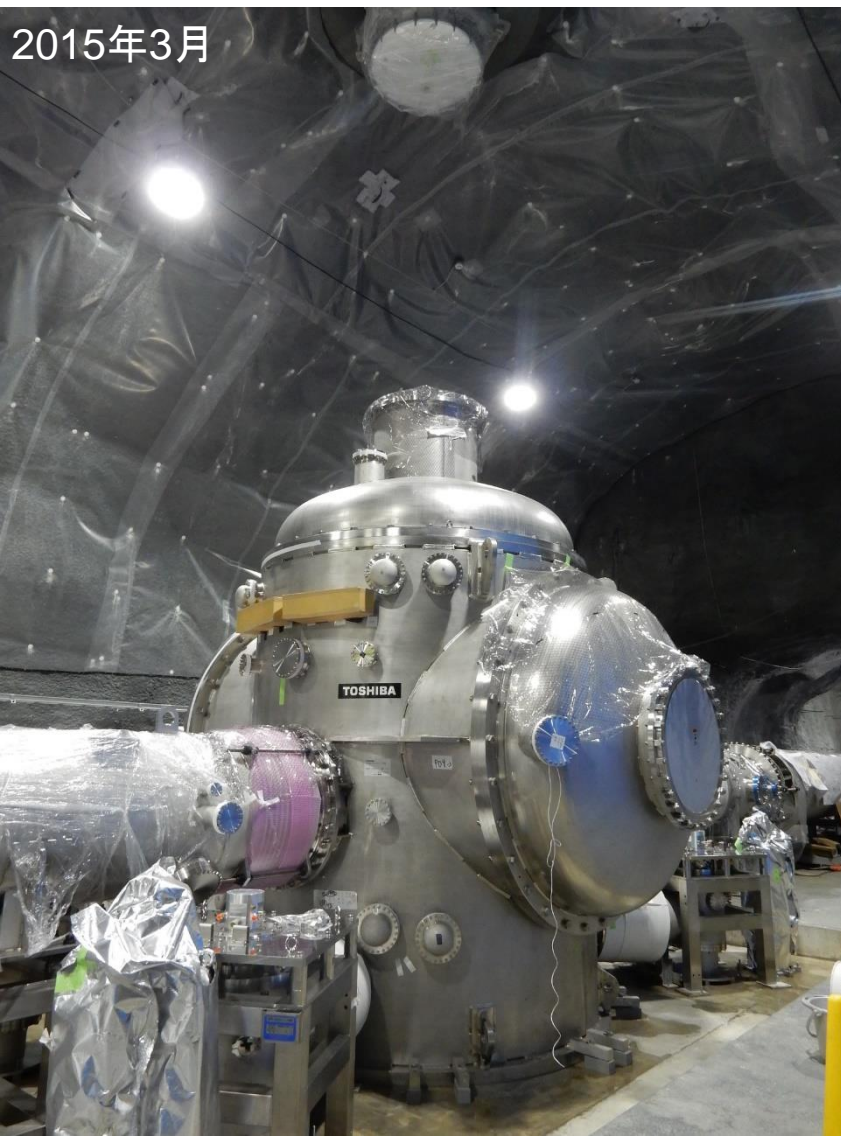
# 鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



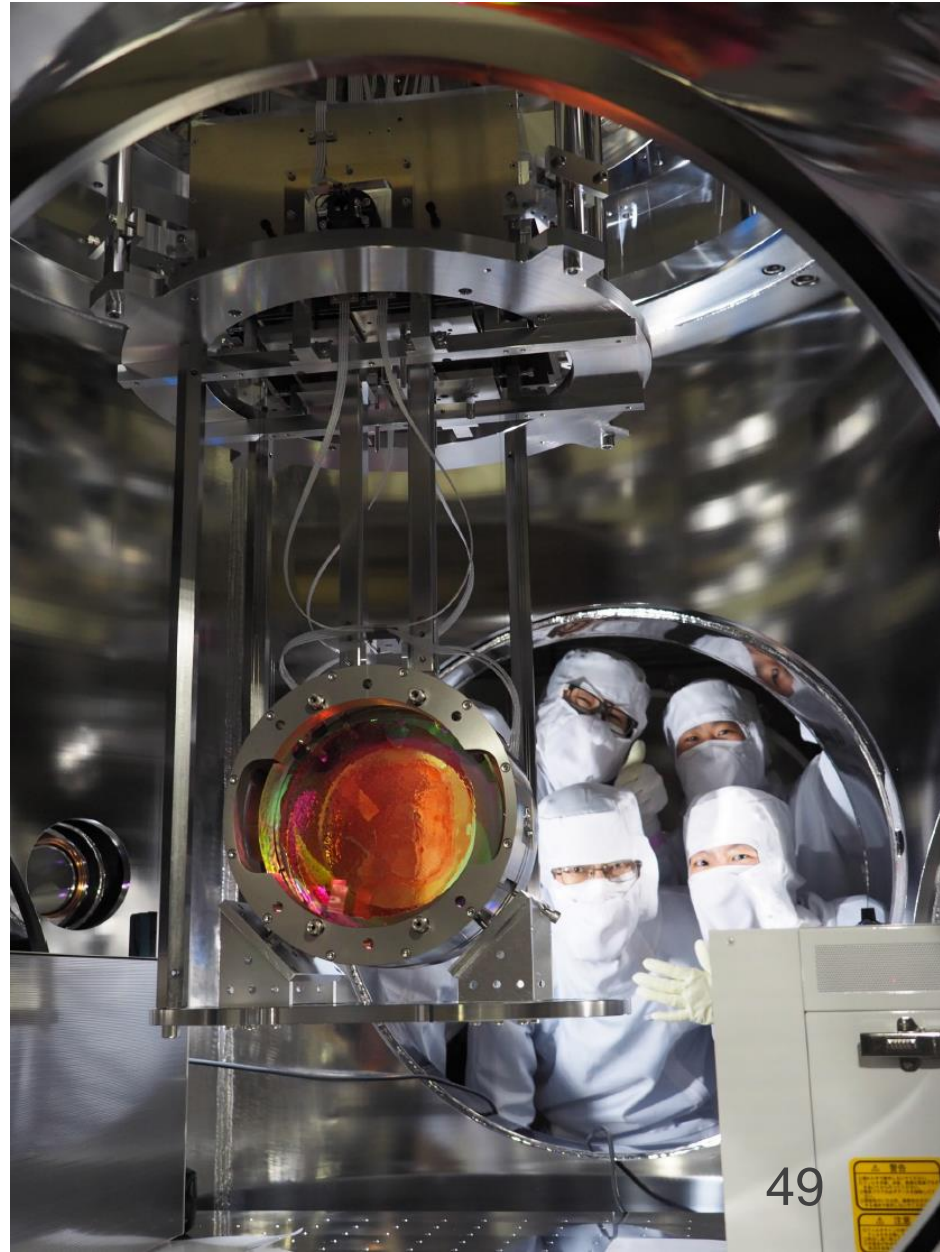
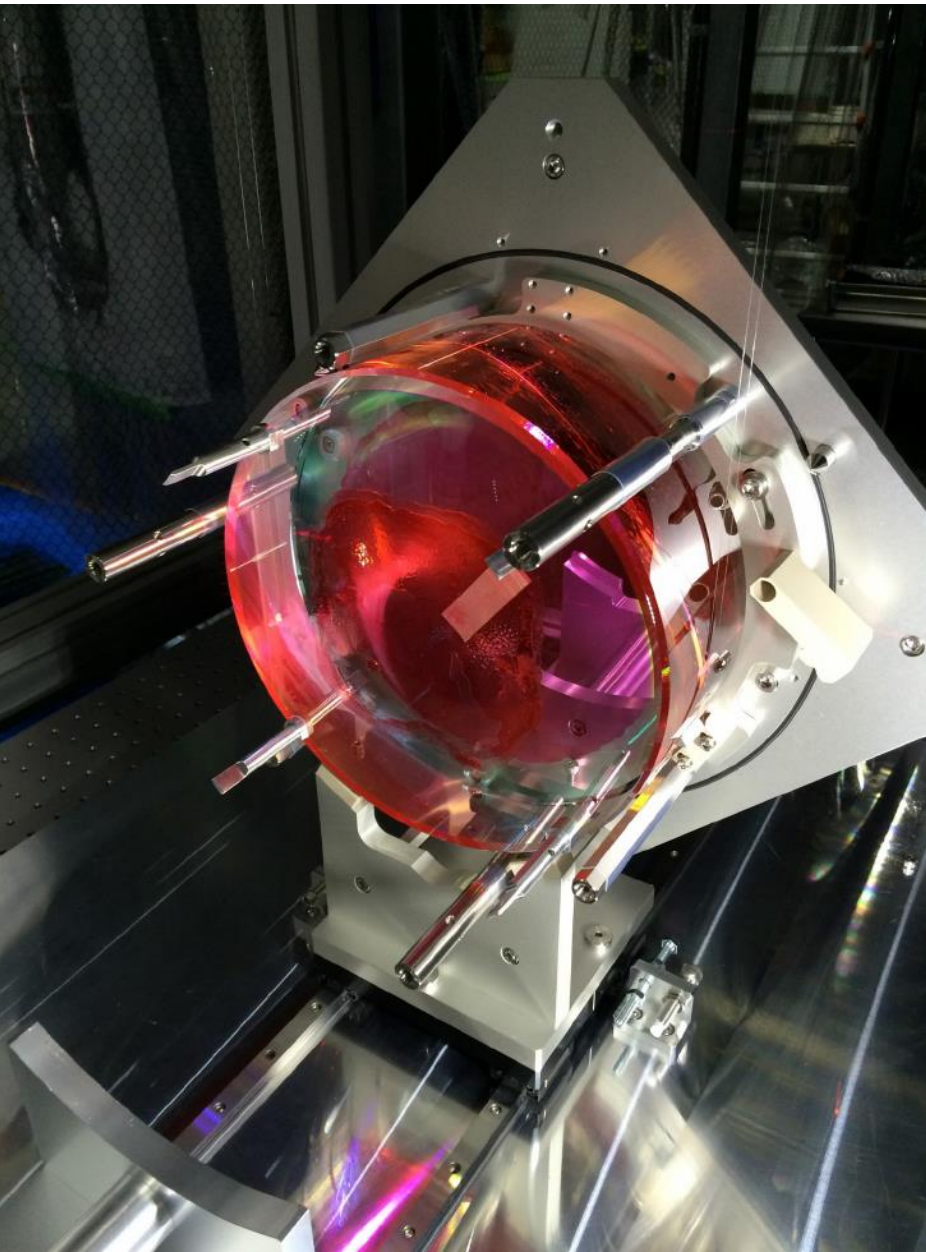
# KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振



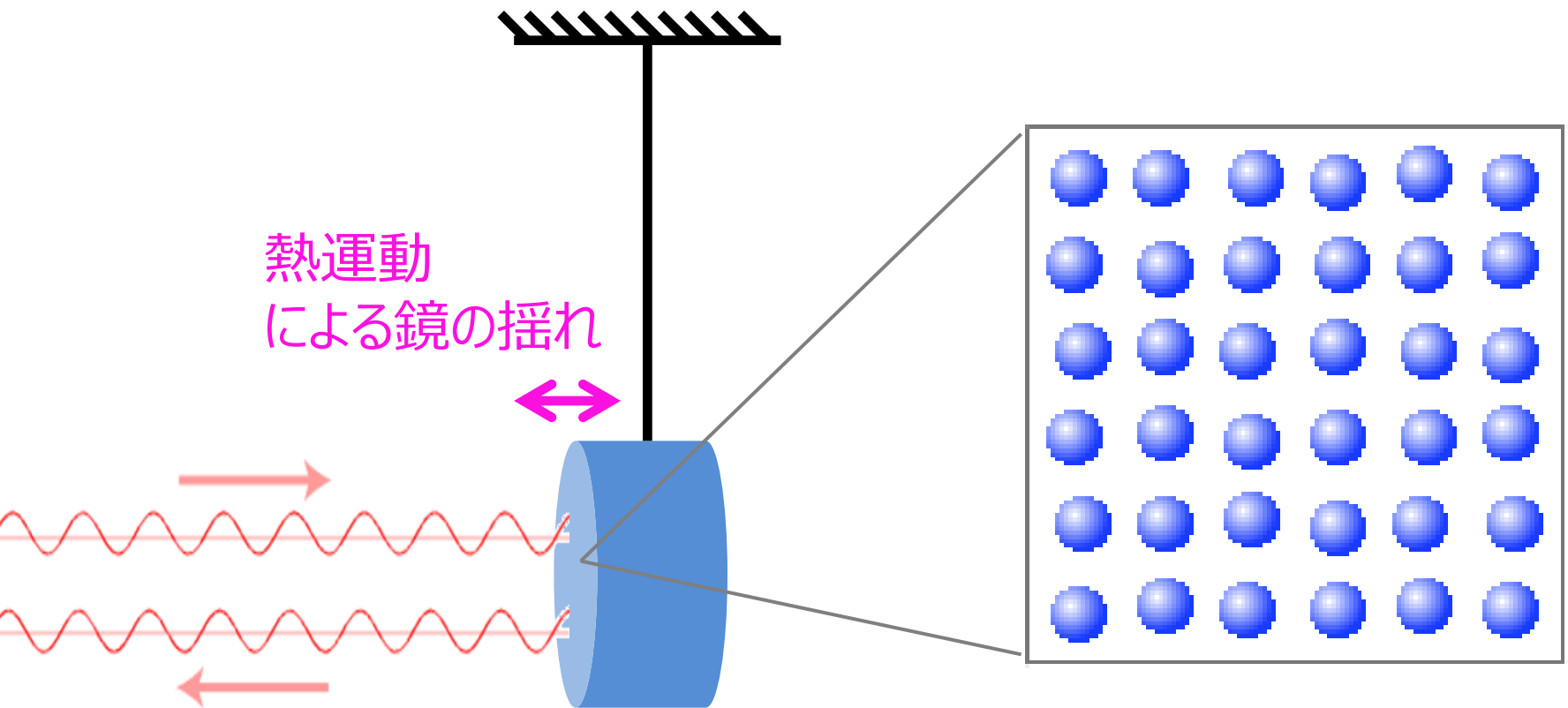


# KAGRAの鏡の防振装置



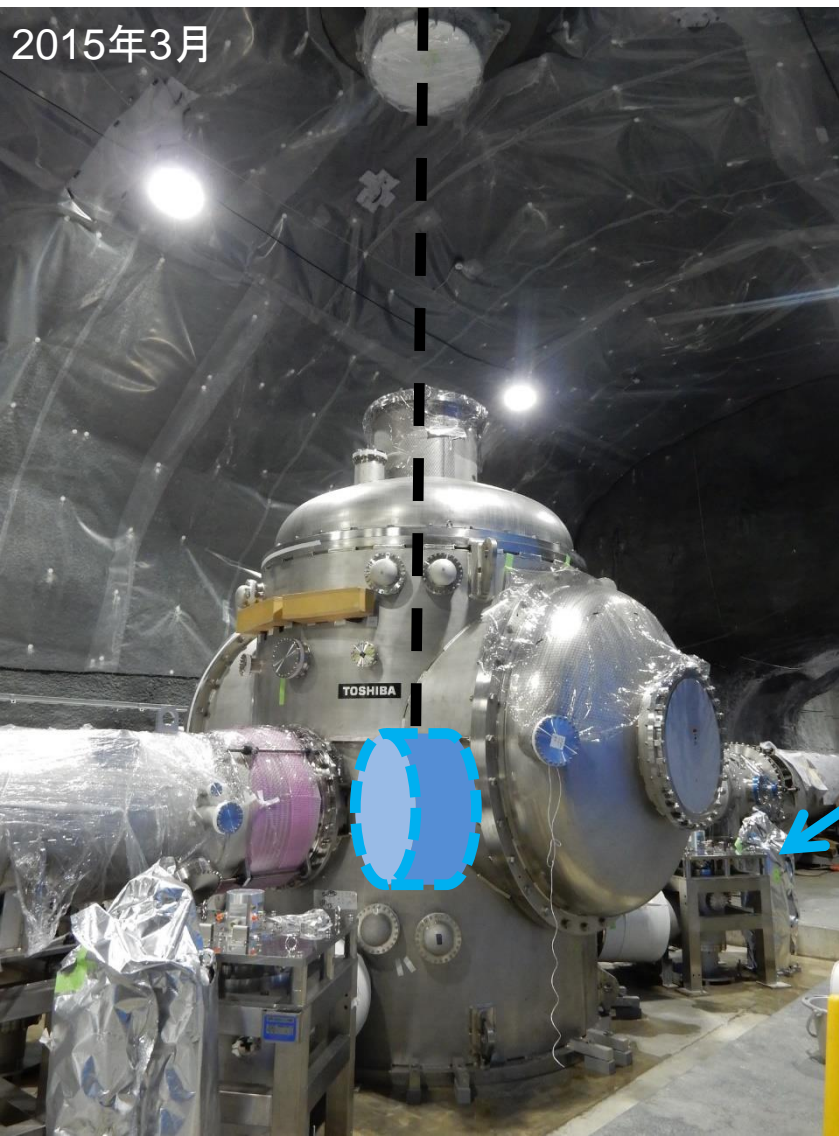
# 鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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

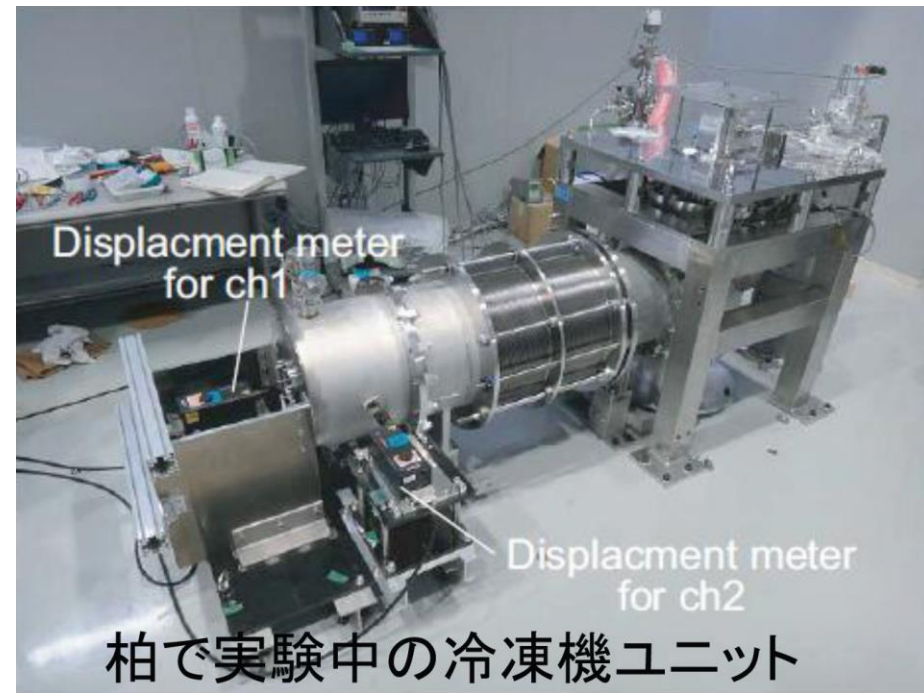


# KAGRAの低温装置

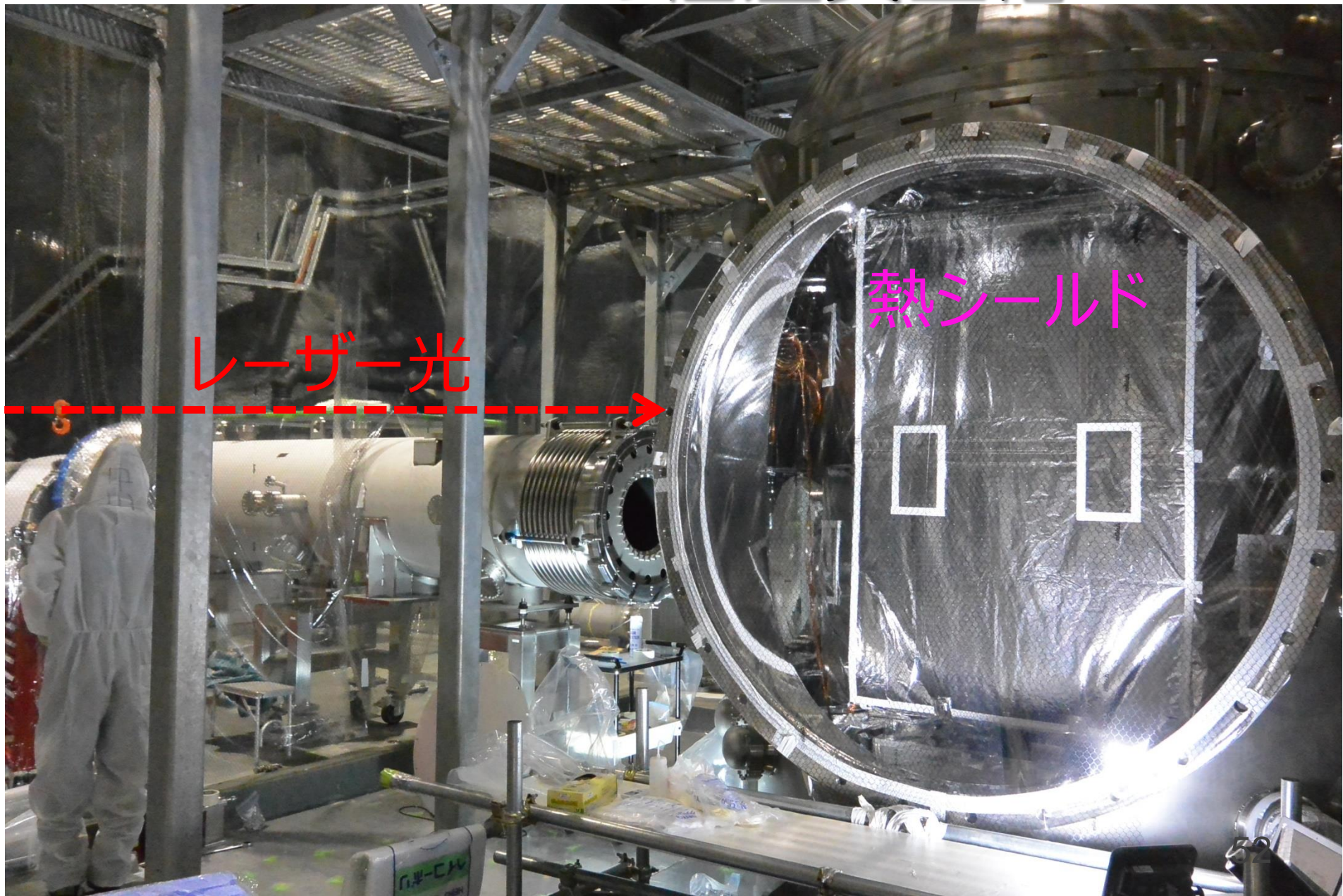
- 最低振動の冷凍機を開発



## 冷凍機



# 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 23 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



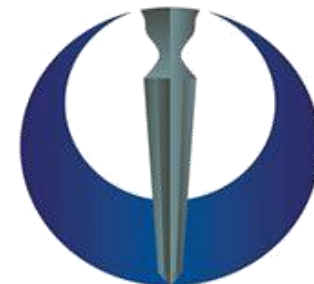
# KAGRAのクリーン環境

- 鏡にほこり一つ付けない  
スーパークリーンブース



# 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



トンネル掘削  
(国内最速)



クリーン環境



KAGRA

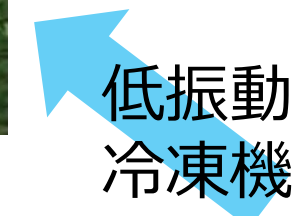
超高真空装置



極低温技術



低振動  
冷凍機



計算機システム



……などなど

# 地元との協力関係



神岡の重力波オフィス  
(元々は保育園)



地元説明会



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

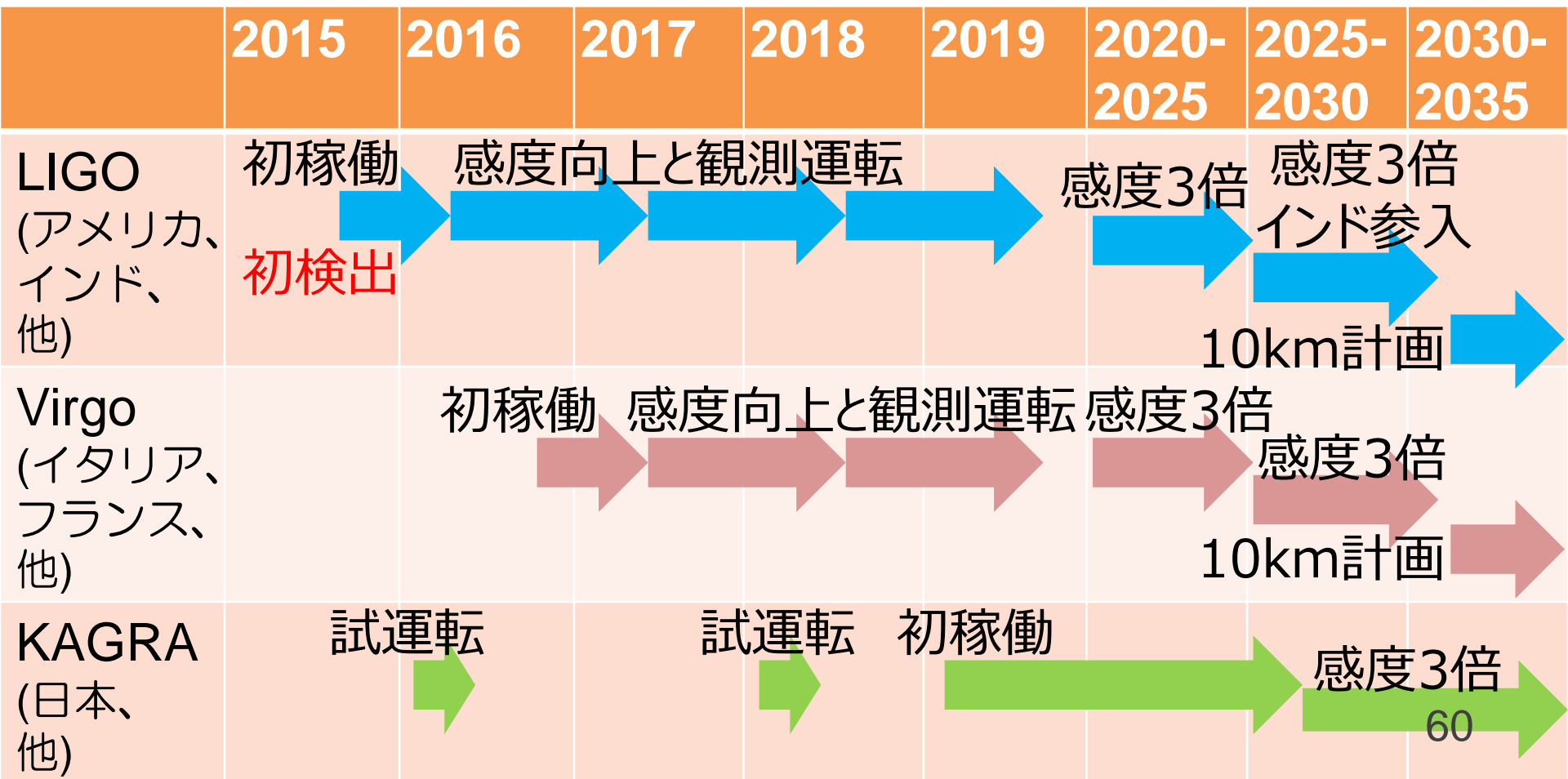
中性子星連星  
からの重力波？

超新星爆発  
からの重力波？

さらなる  
ブラックホール連星の発見？

連星の  
波源特定？

連星の形成  
メカニズム解明？



# KAGRAとLIGOの比較

	予算承認時期	予算	参加者数
LIGO (アメリカ)	1990年 (改良型は 2004年)	約1200億円 (2台分)	約1000人
KAGRA (日本)	2010年	約150億円	約240人

- 日本は将来の技術を先取りしている  
低温、地下建設

ちなみに新国立競技場は1490億円

リニア中央新幹線は5兆円 61

# 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



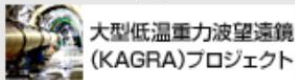
English

いま貢献していただけること [プロジェクトをさがす](#)

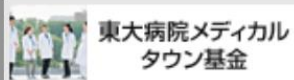
## 大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクト

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
- 岐阜県神岡で大型低温重力波望遠鏡KAGRA建設中  
地下建設と低温で雑音を下げる独自の工夫  
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)
  - 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)
  - 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

補助スライド

# 衣川ら(2014)の理論モデル

- 最近できた星(POP I)だと大質量ブラックホールはできない
- 宇宙初期にできた初代星(POP III)に着目
  - 30太陽質量程度のブラックホール連星がたくさんできる
  - 形成率がLIGOの推定結果と無矛盾

最近できた星だと10太陽質量程度にしかない

初代星だと30太陽質量程度にピーク

