

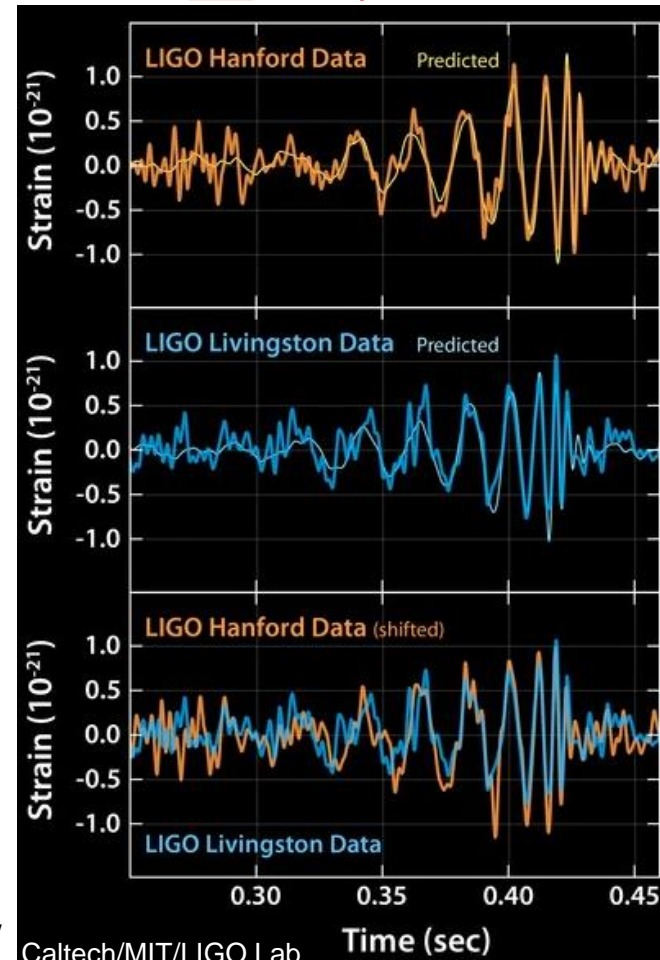
重力波望遠鏡KAGRAで聞く！ ブラックホール誕生の声

道村唯太

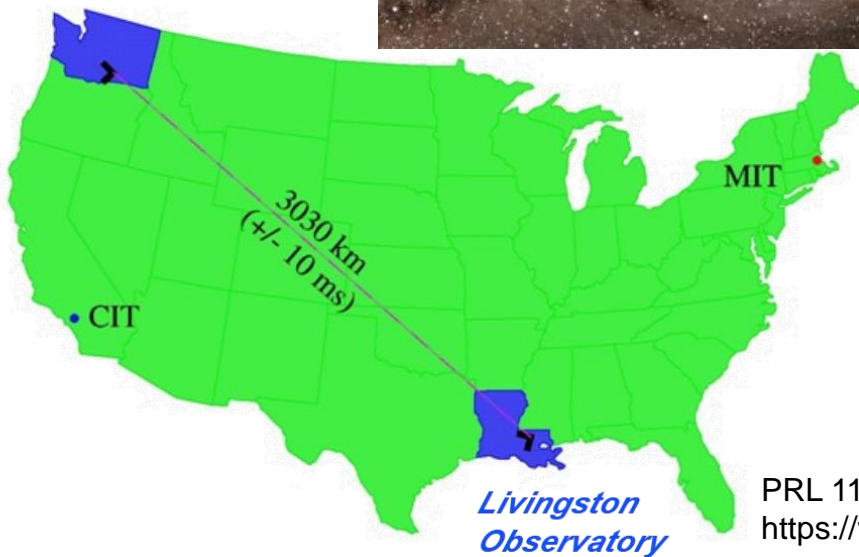
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

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



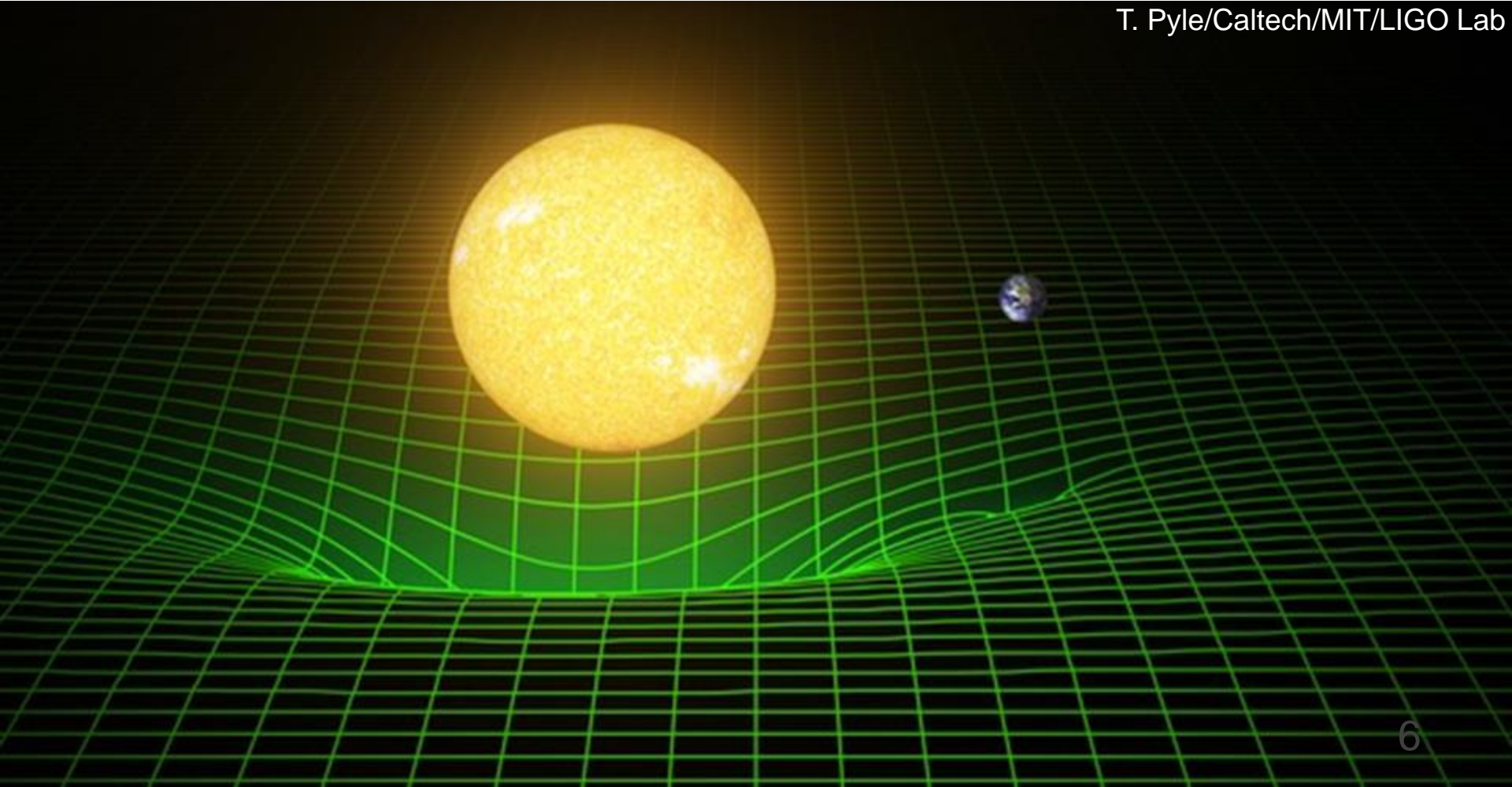
今回のお話

- **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

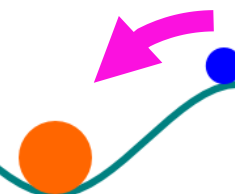
なにもないトランポリンは平ら



ボールを置くと
トランポリンが歪む

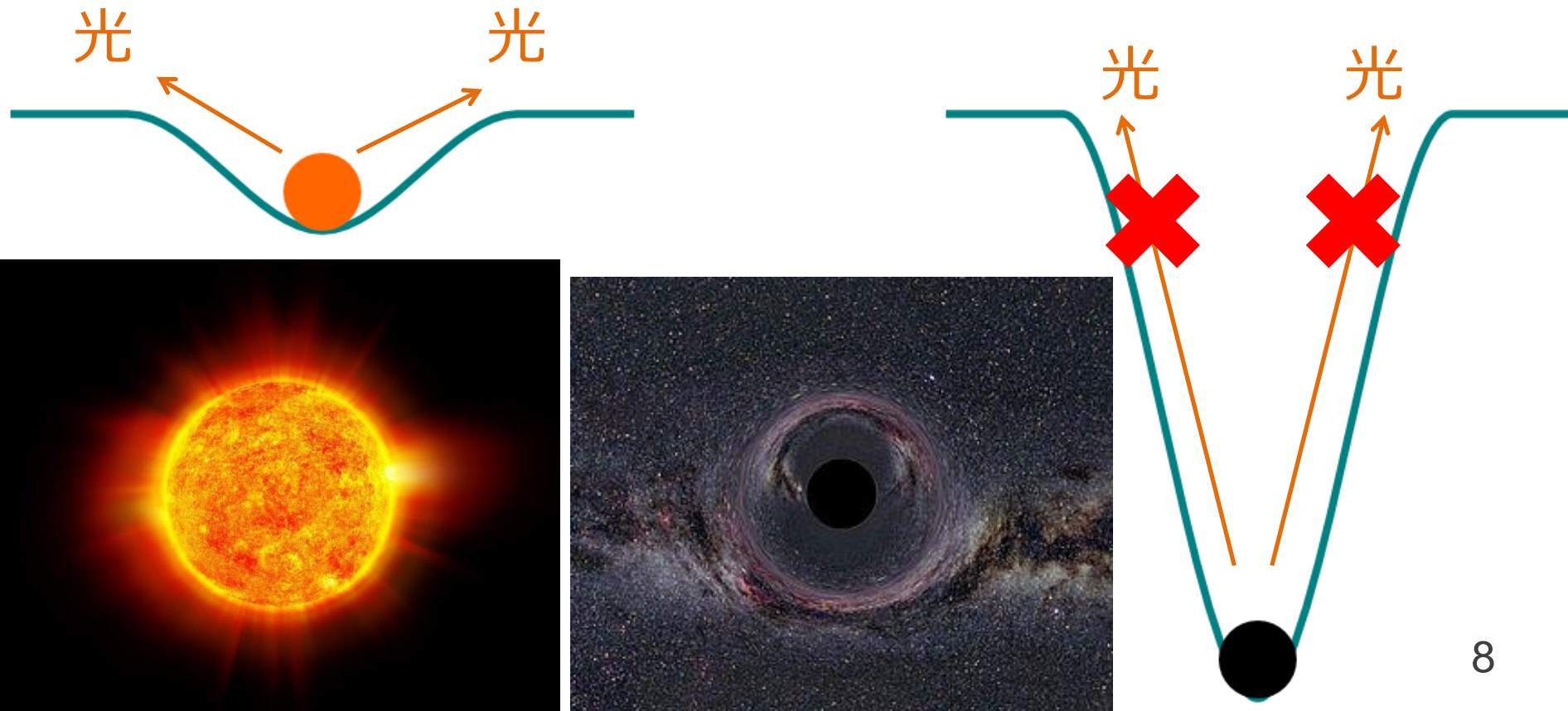


近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる



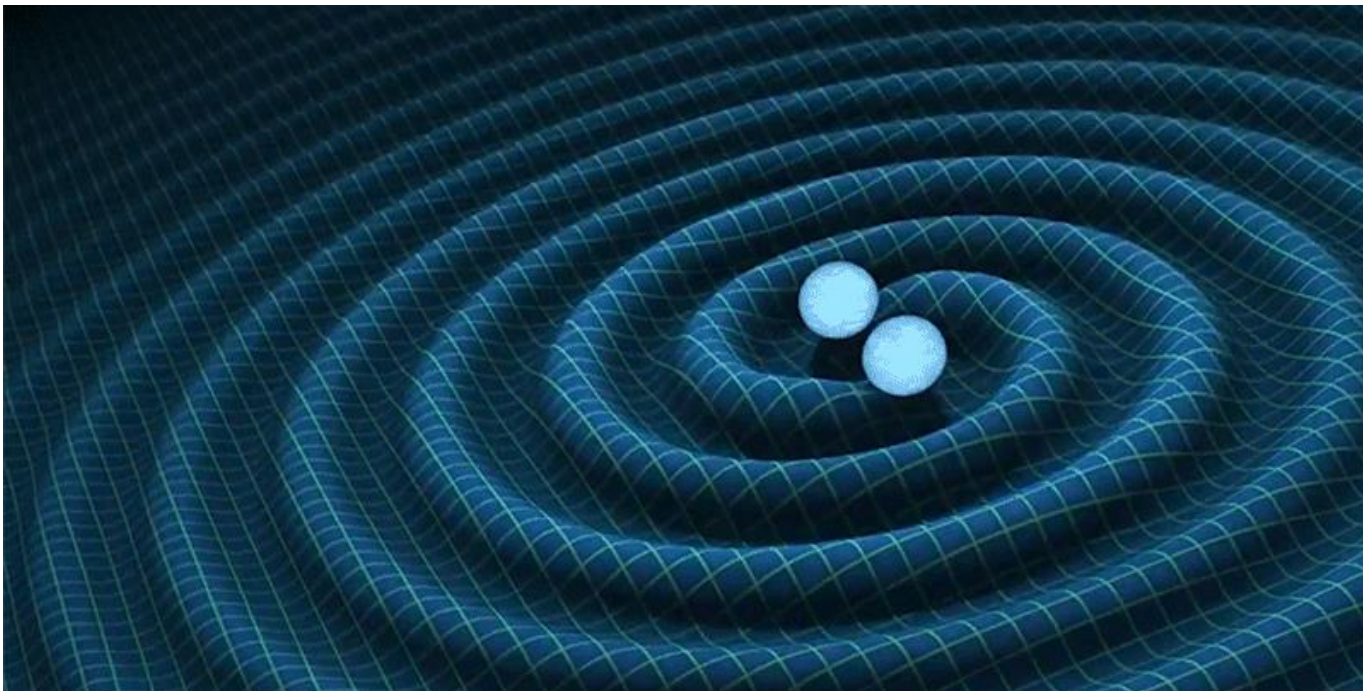
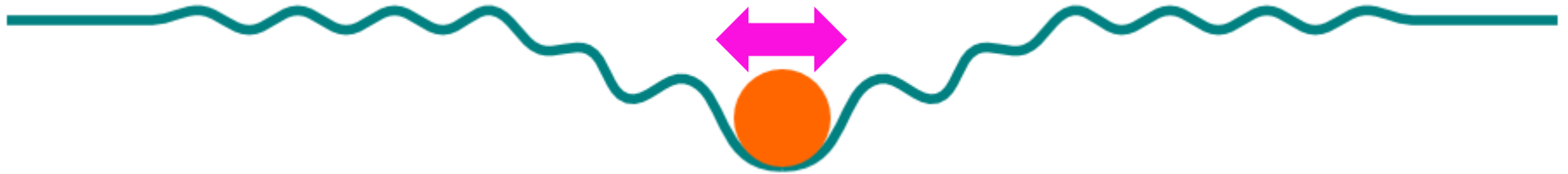
ブラックホール

- 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



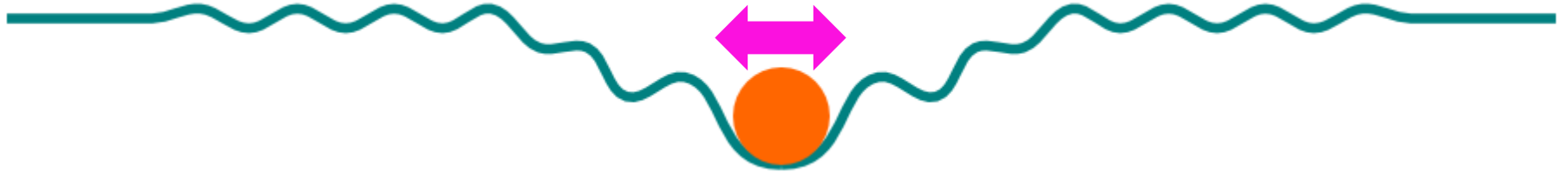
重力波は「時空のさざ波」

- 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」

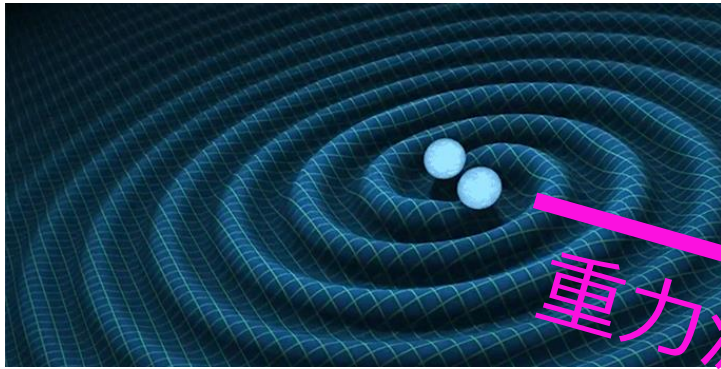
- 物体が動くと空間の歪みが増え、光の速さで伝搬する → これが重力波



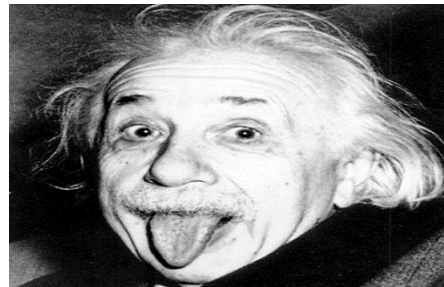
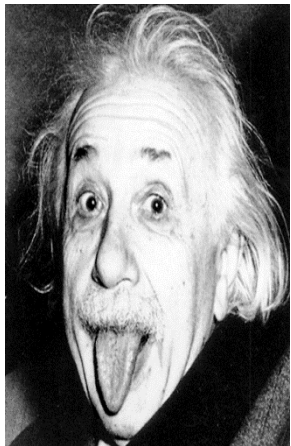
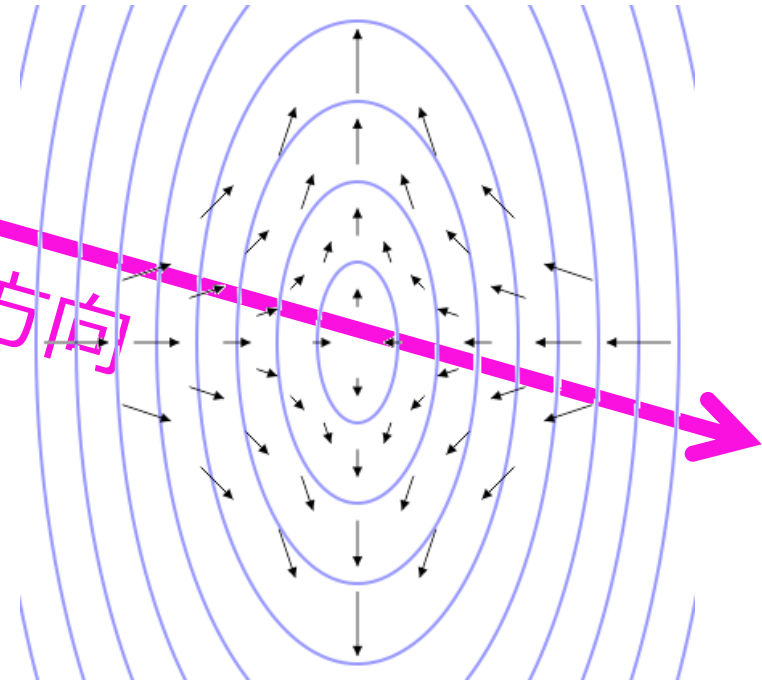
水の波紋
に似ている

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)

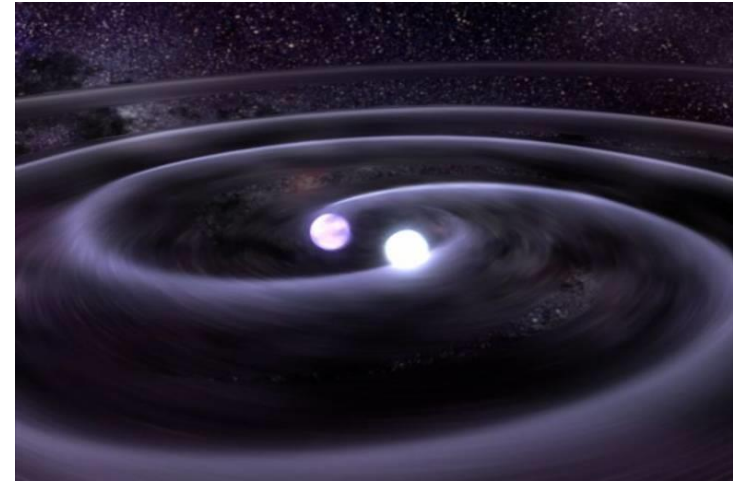


重力波の伝わる方向



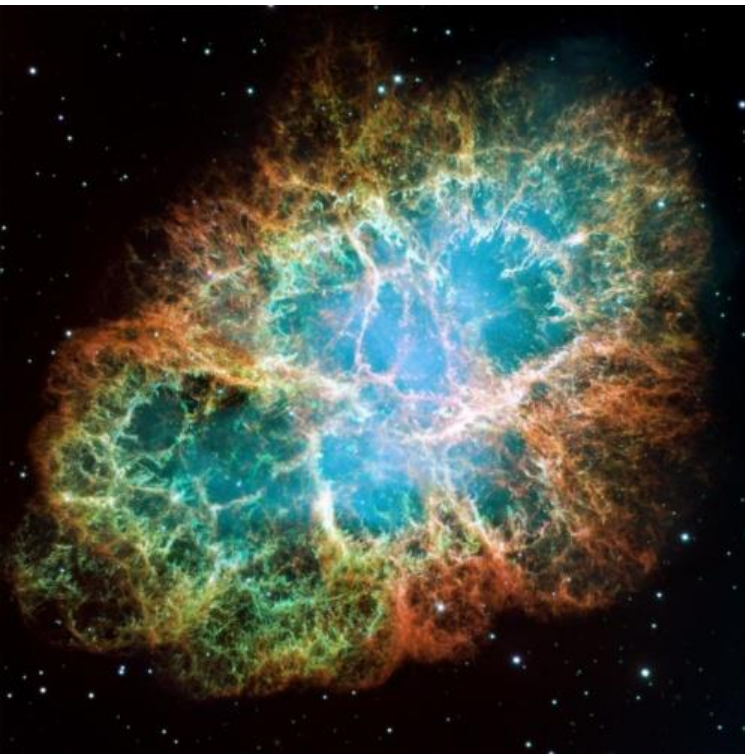
重力波源となり得る天体現象

- とても重く、
とても速く動く天体

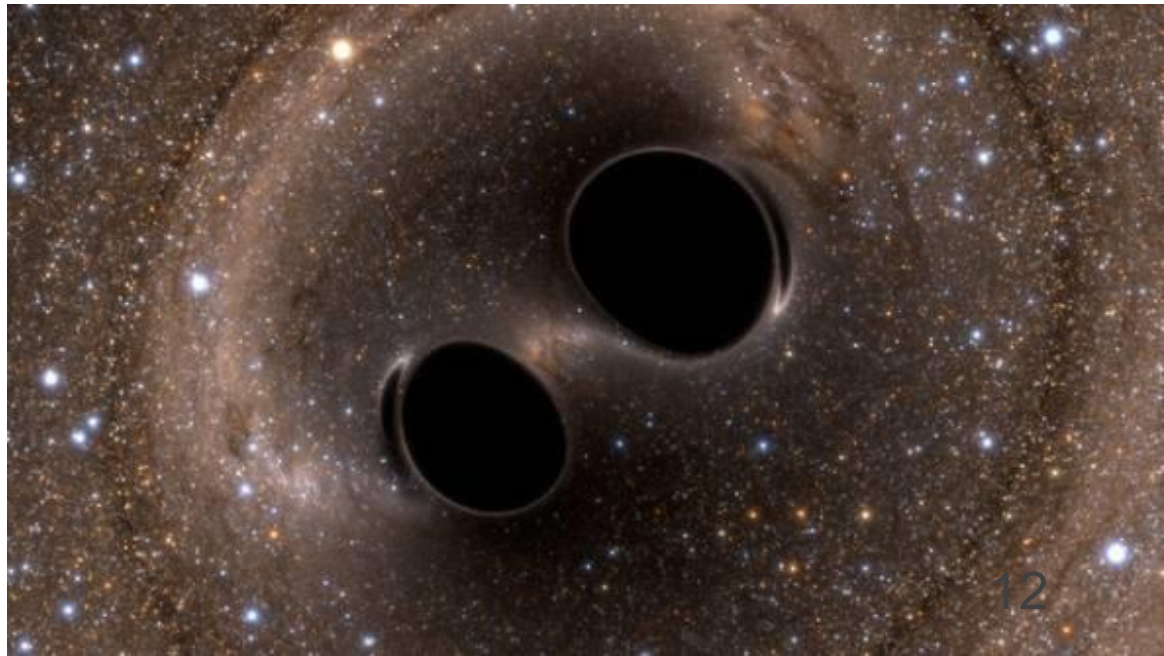


中性子星連星

超新星爆発



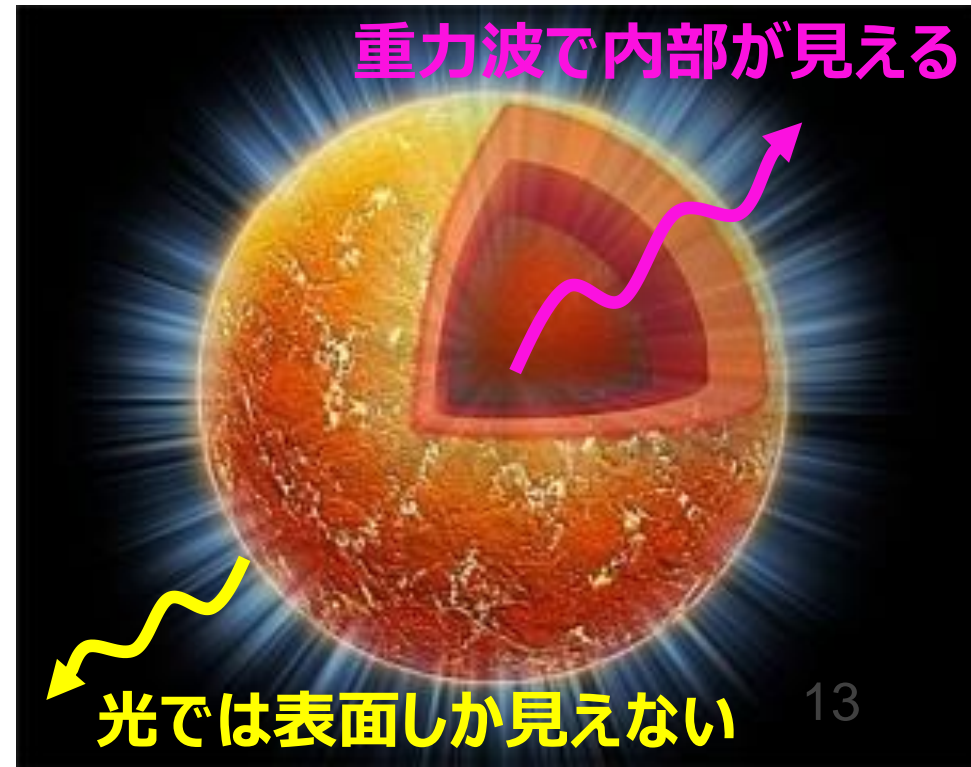
ブラックホール連星



重力波で何がわかる？

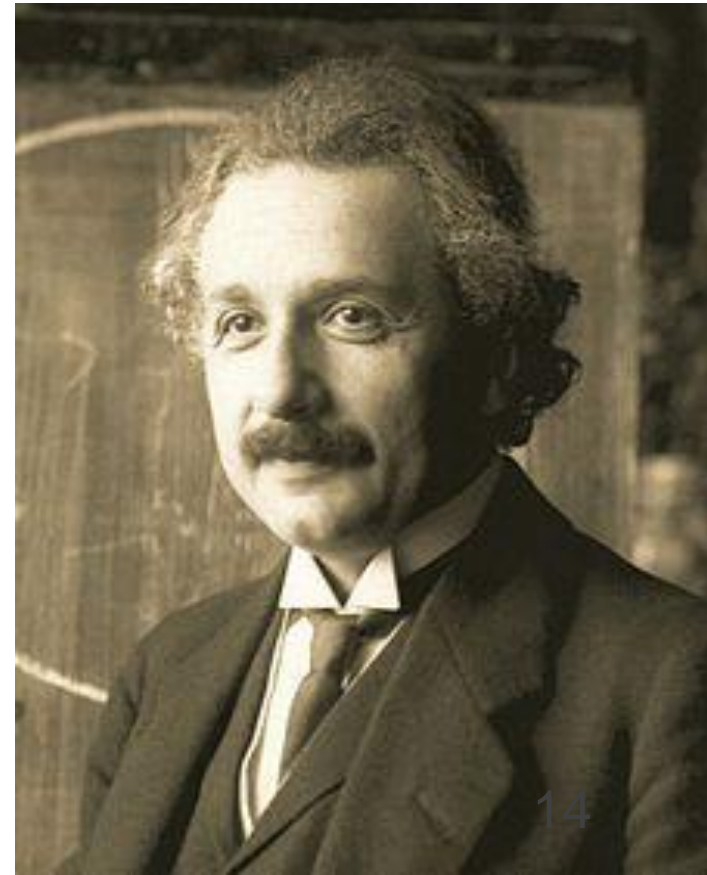
- 星の中を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- 光で見ることができない天体を見ることができる
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

エコー写真(音波)でお腹
の中が見えるように



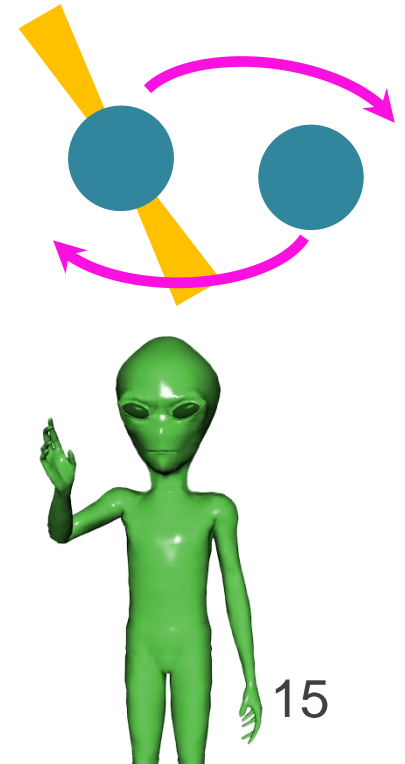
最初は受け入れられなかった重力波

- 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 ファインマン ホイラー



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

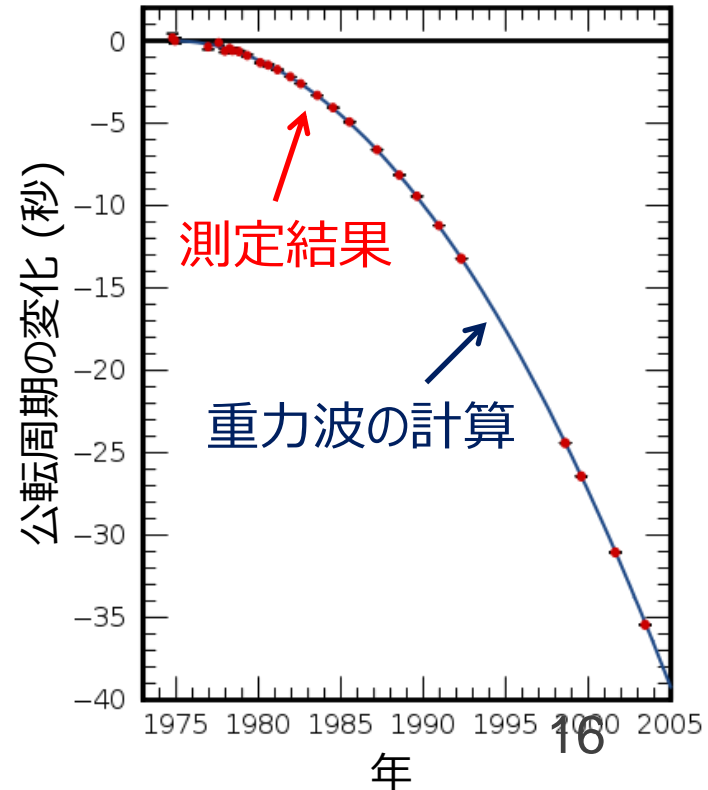
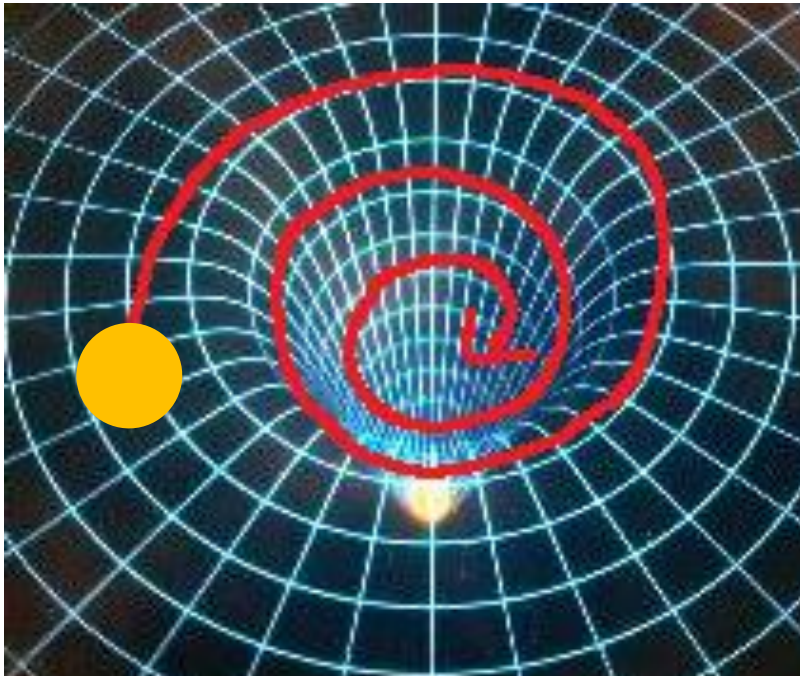


重力波の間接的証拠

- 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

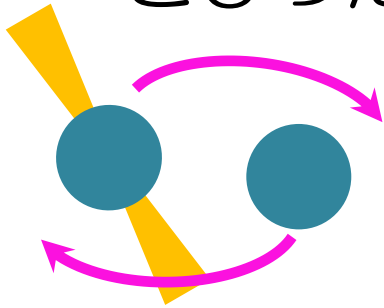


1993年ノーベル賞

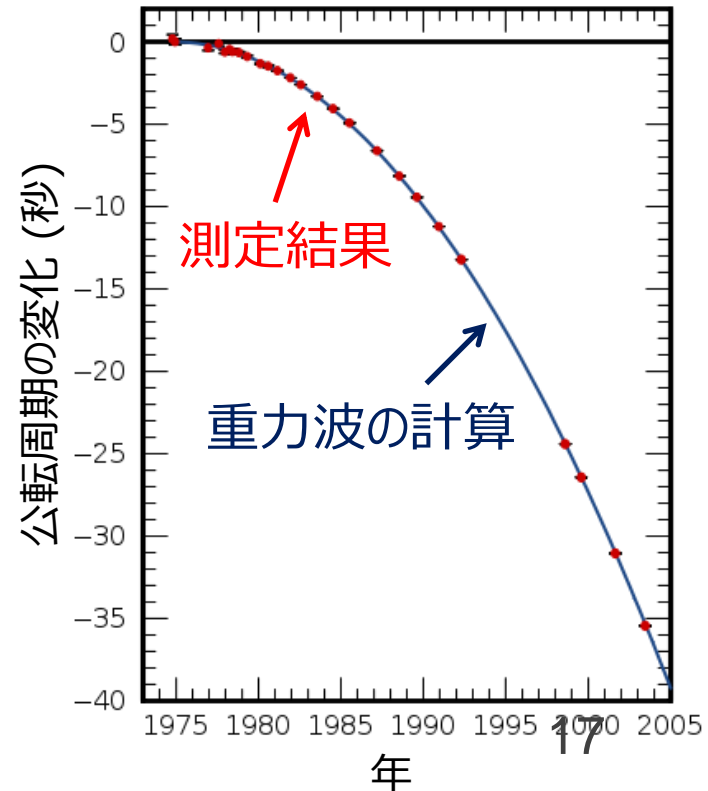


重力波の間接的証拠

- 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

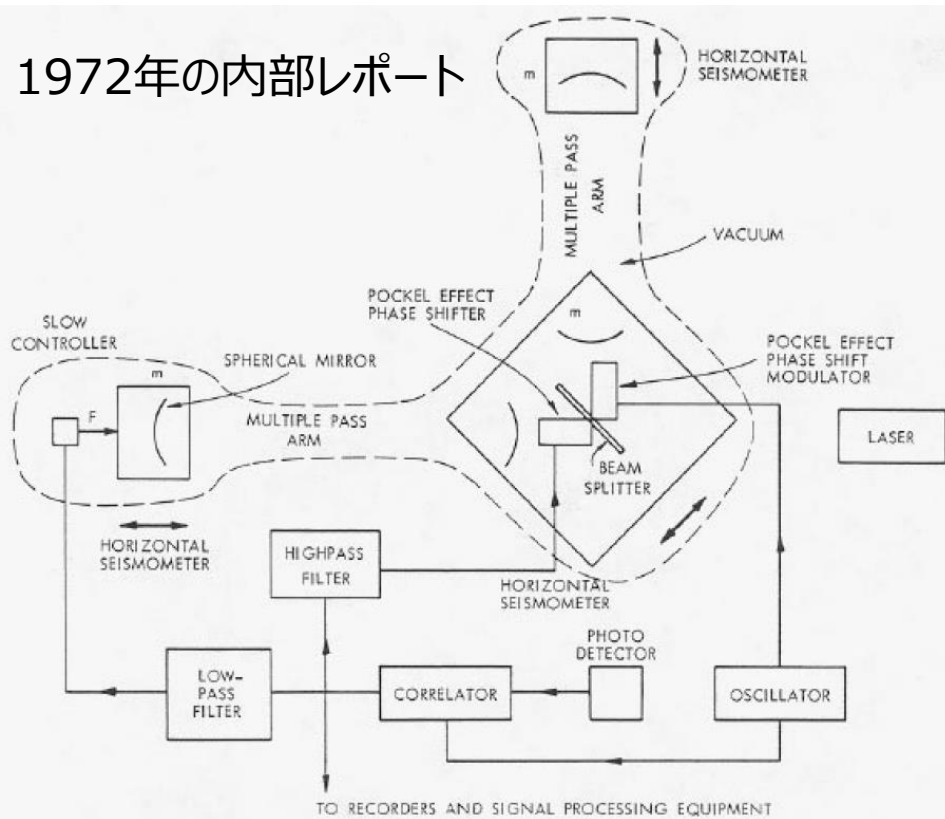


重力波の直接検出の方法

- 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

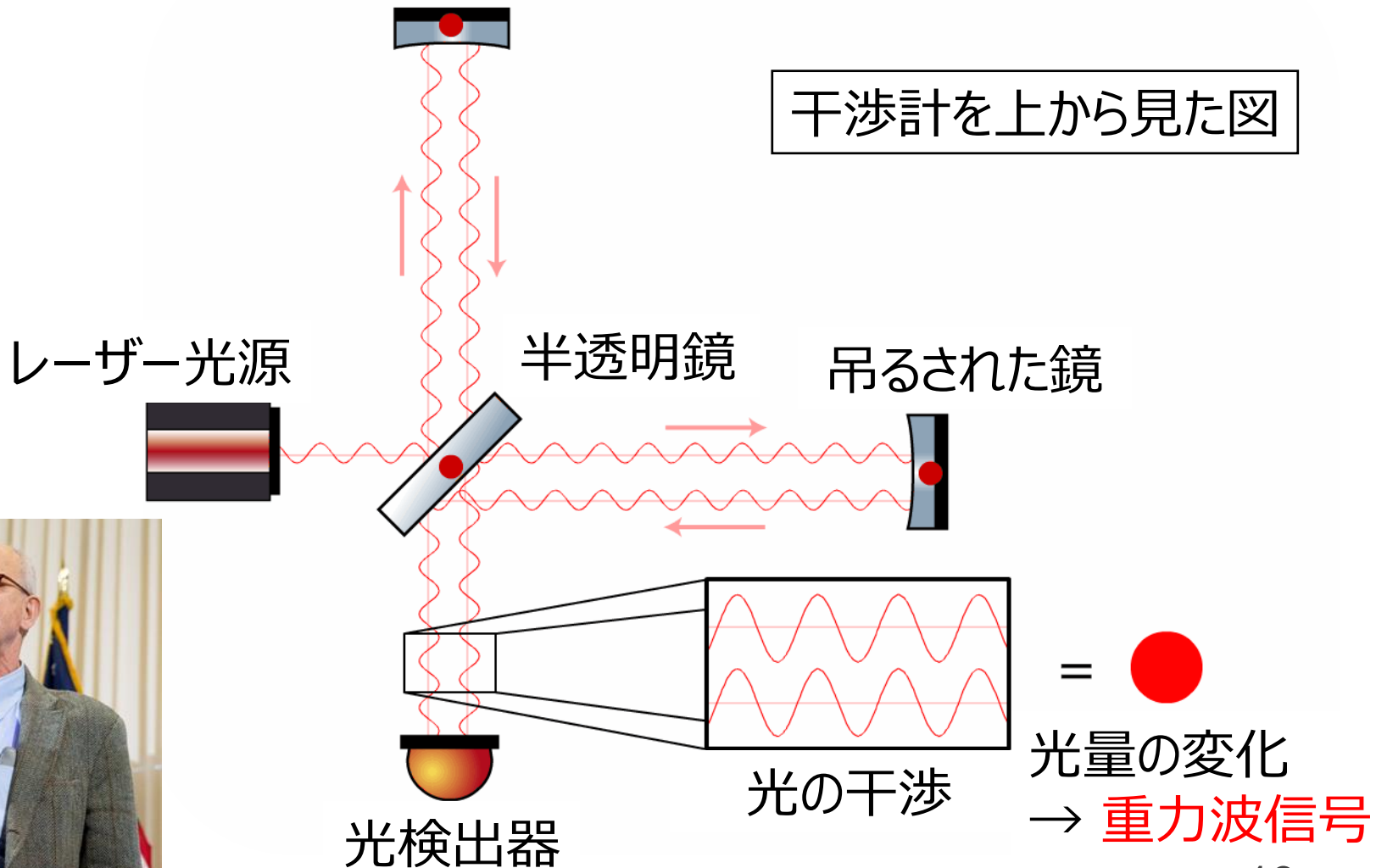


ノーベル賞確実



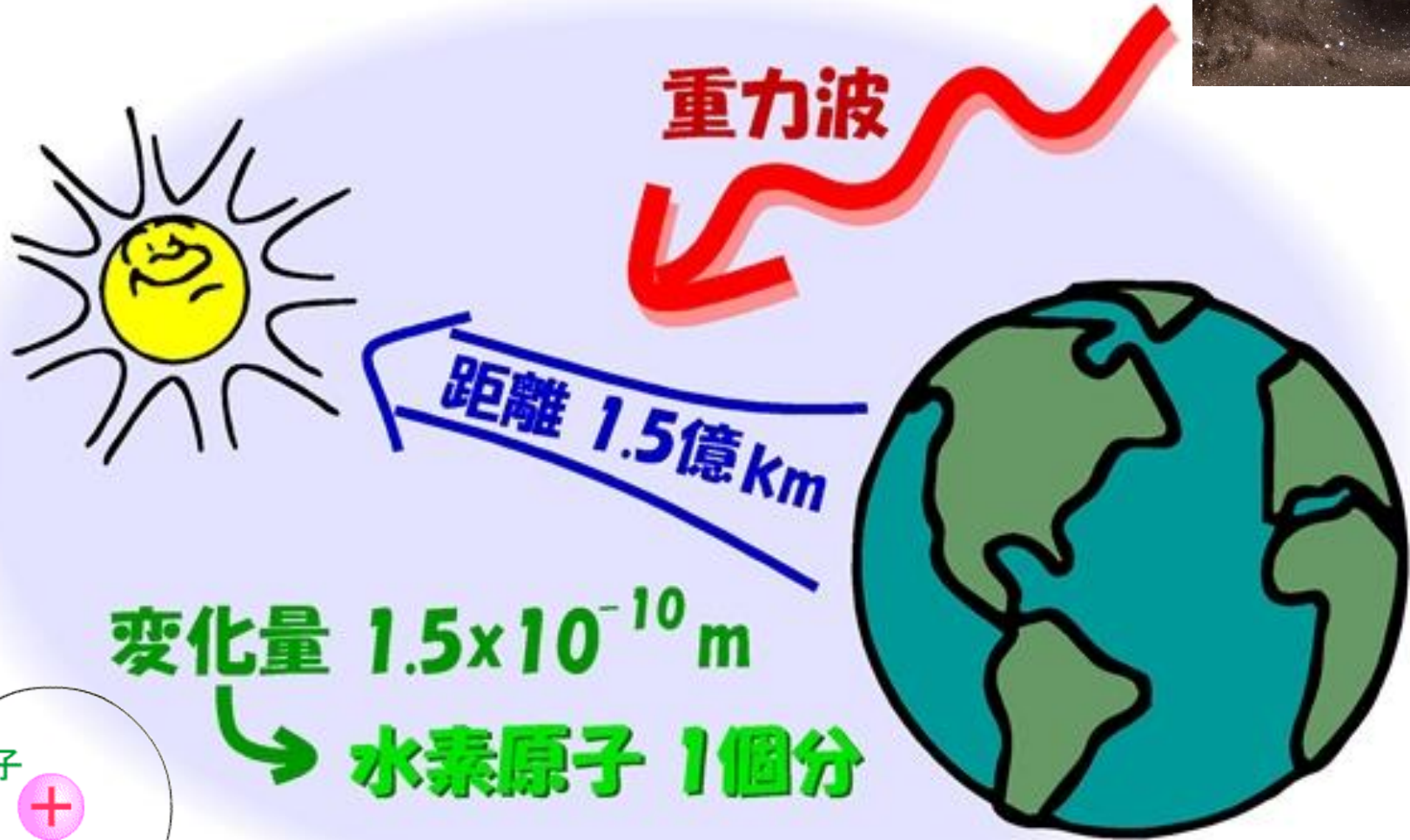
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



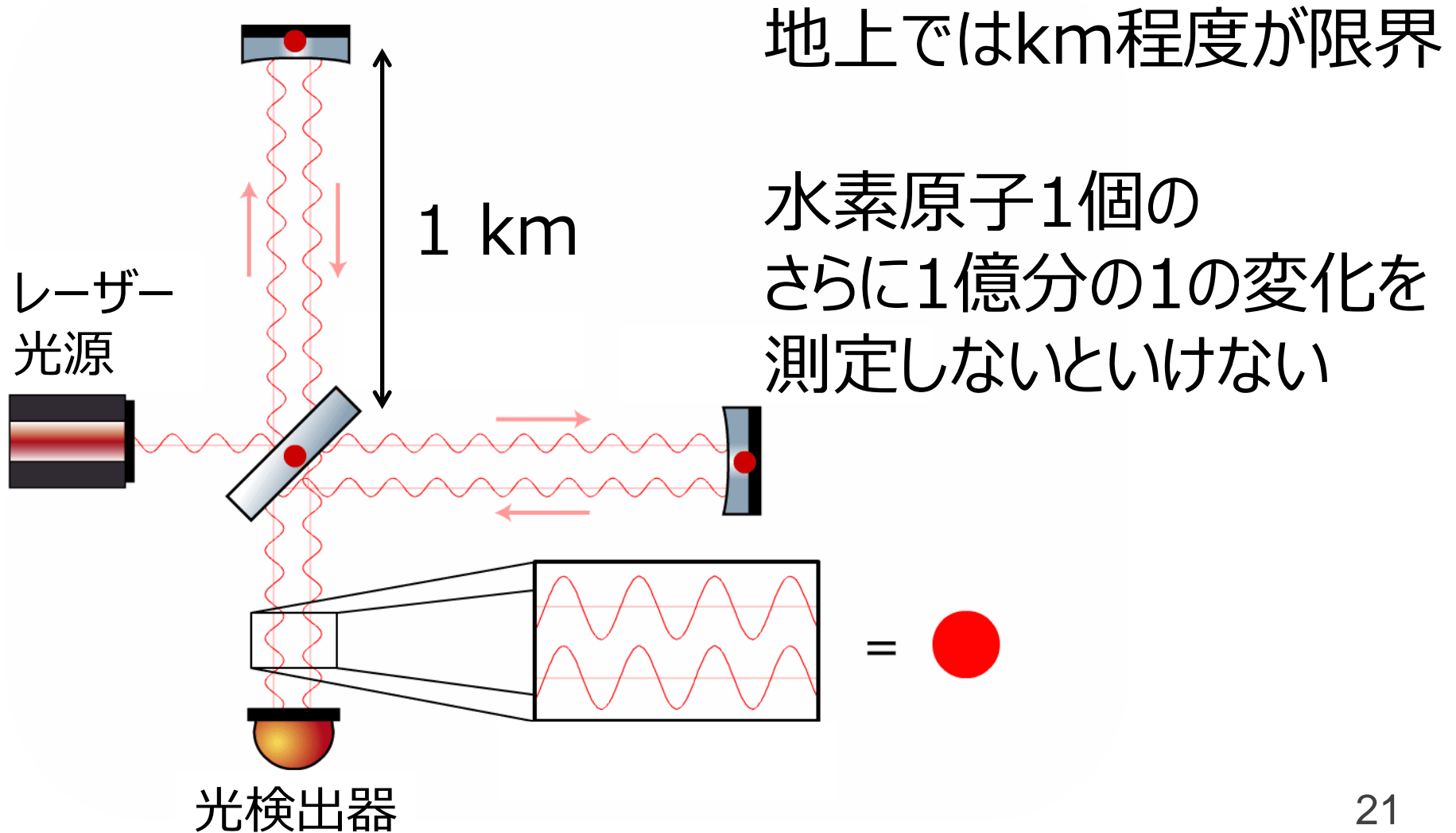
重力波の振幅はどれくらい？

- 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)



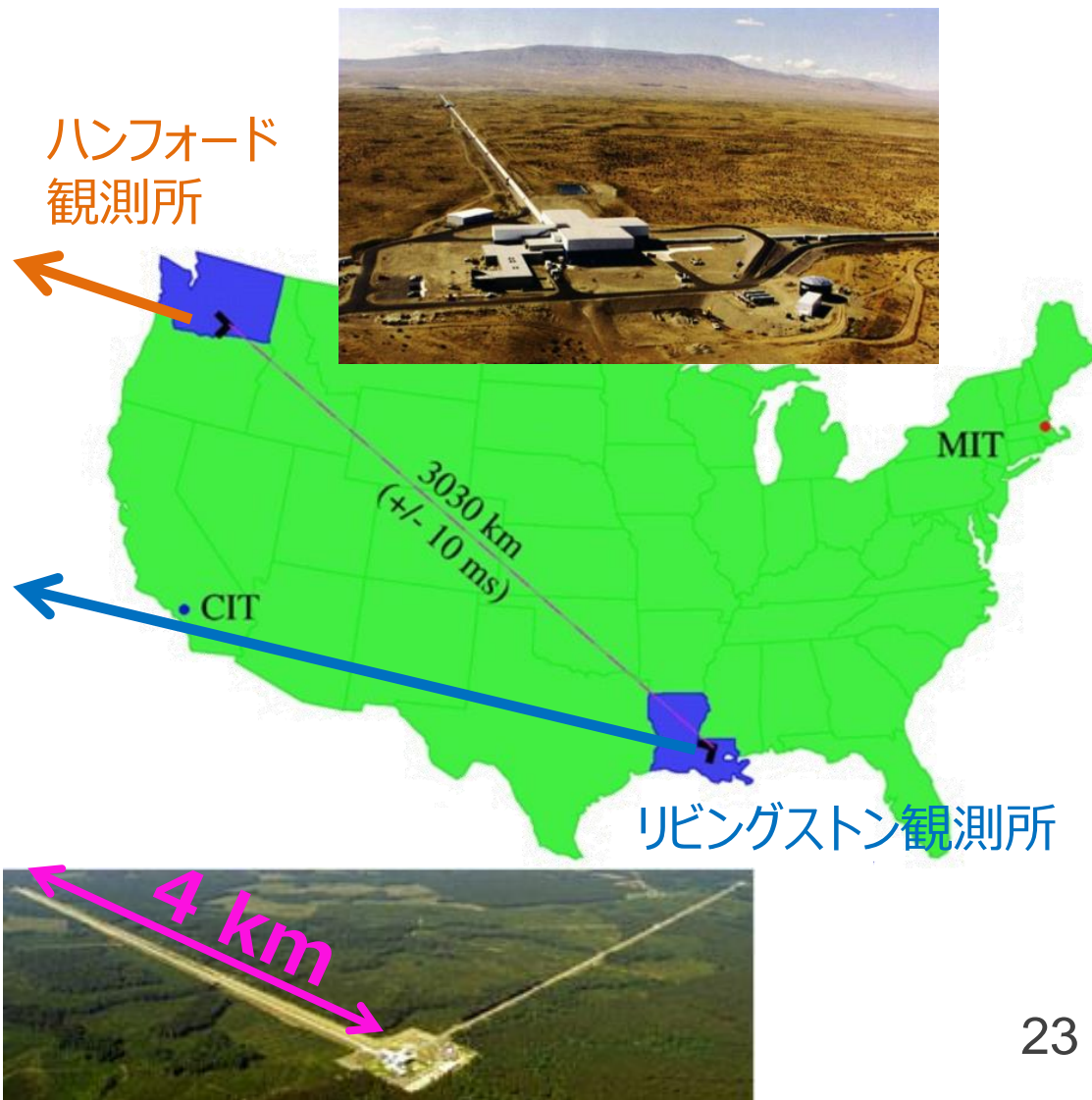
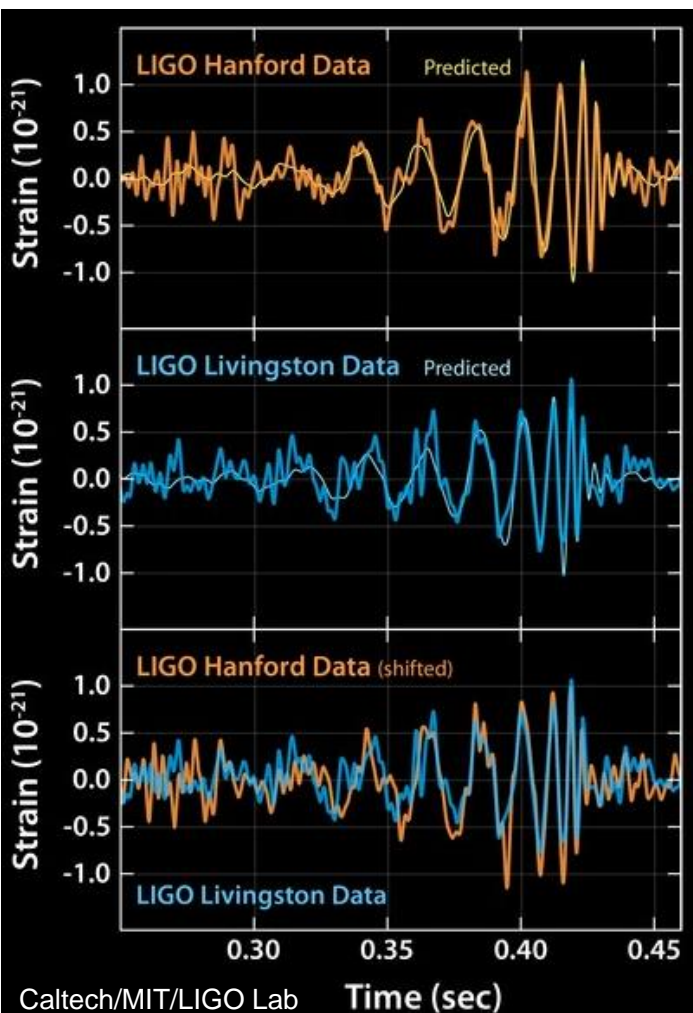
重力波直接検出までの歴史

- 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！



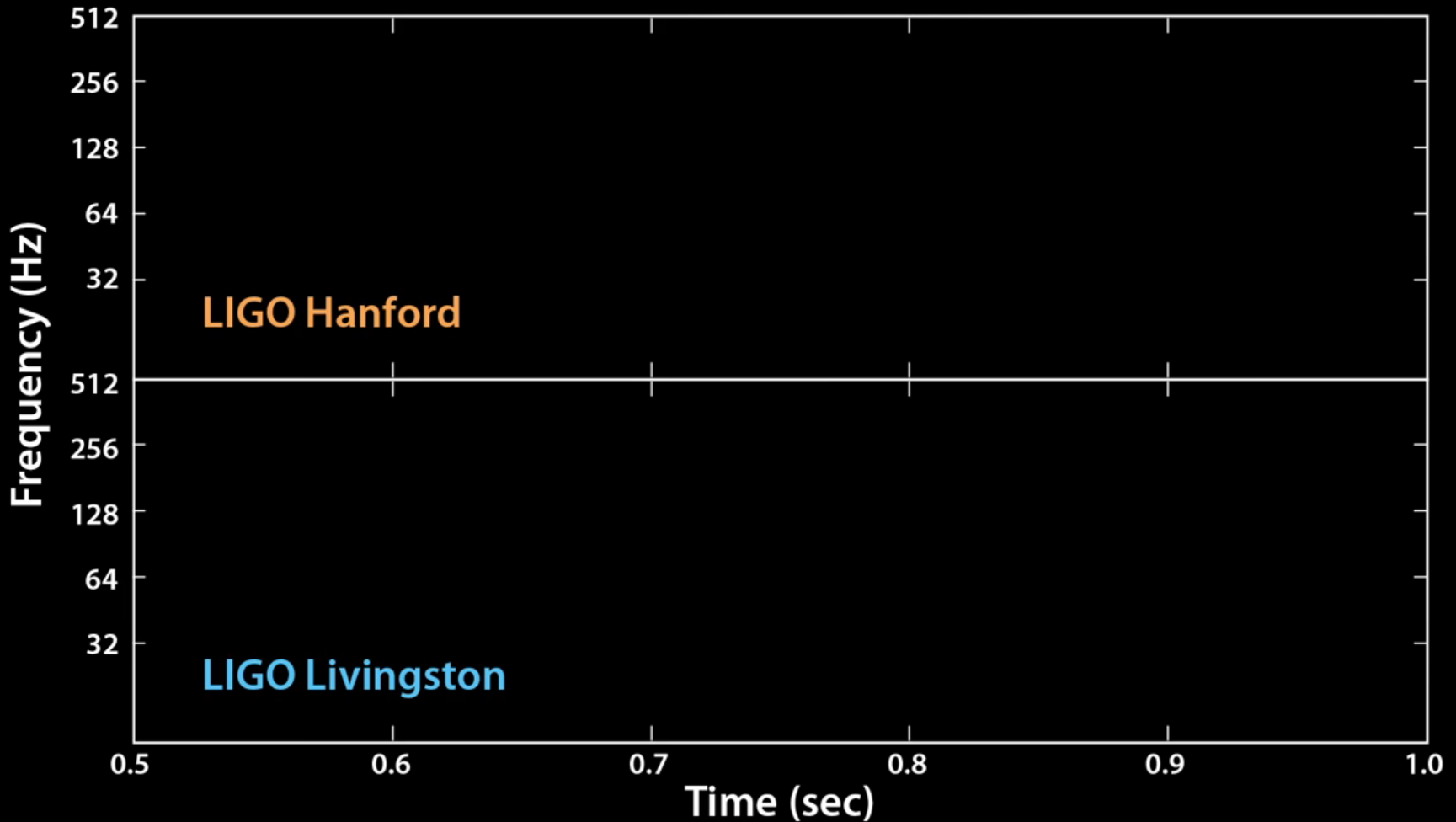
アメリカのLIGOによる初検出

- 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



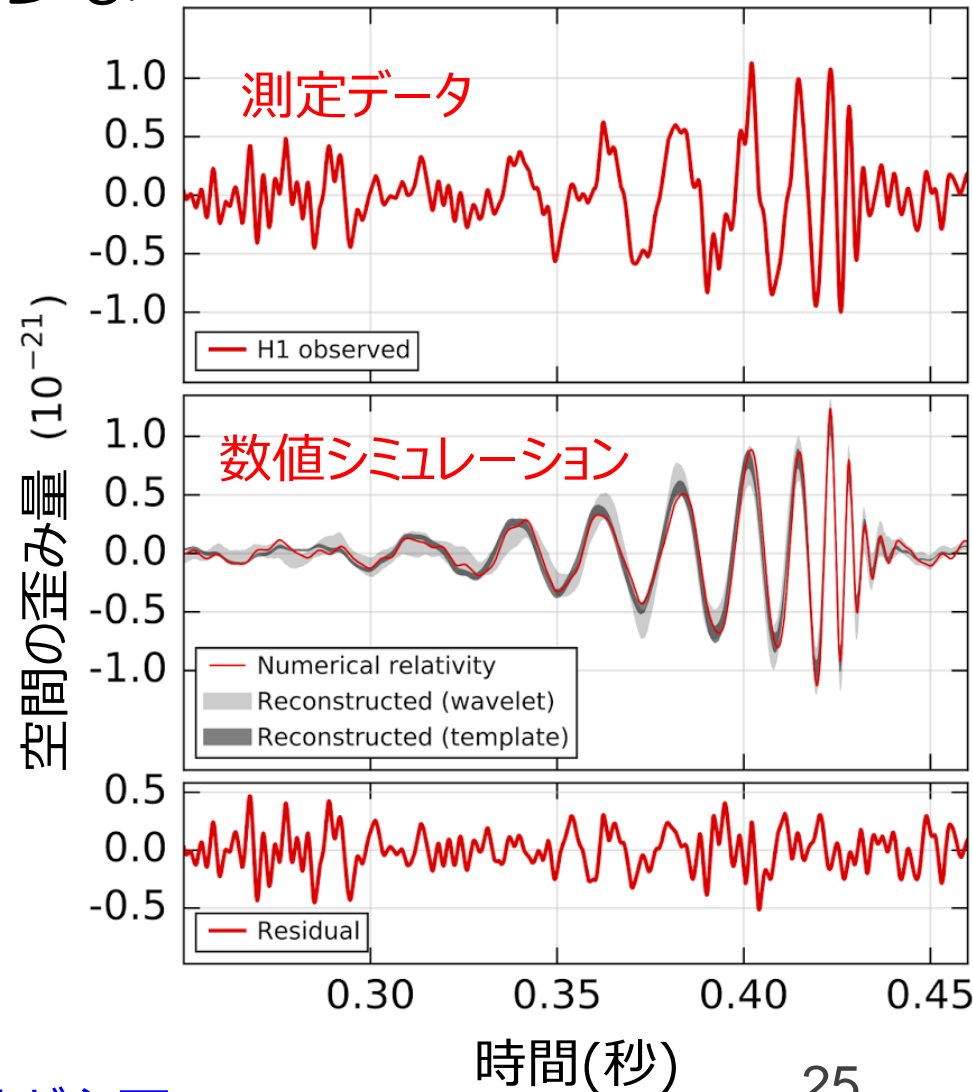
波形が相対論の計算とぴったり

- 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？

- 天体の**質量**と**距離**がわかる

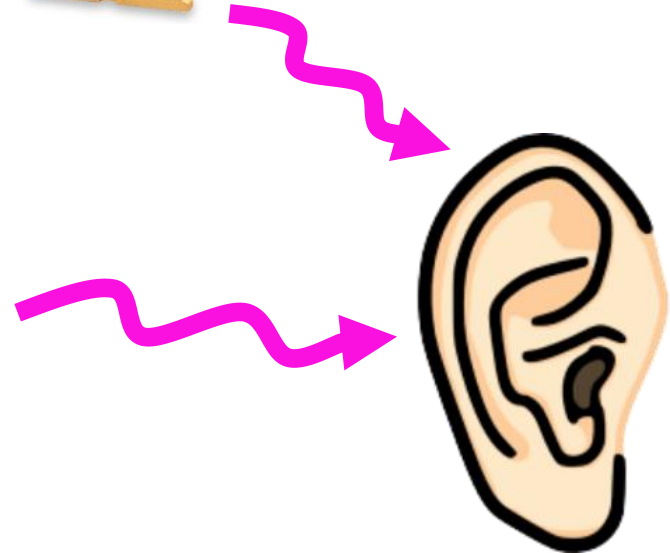
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

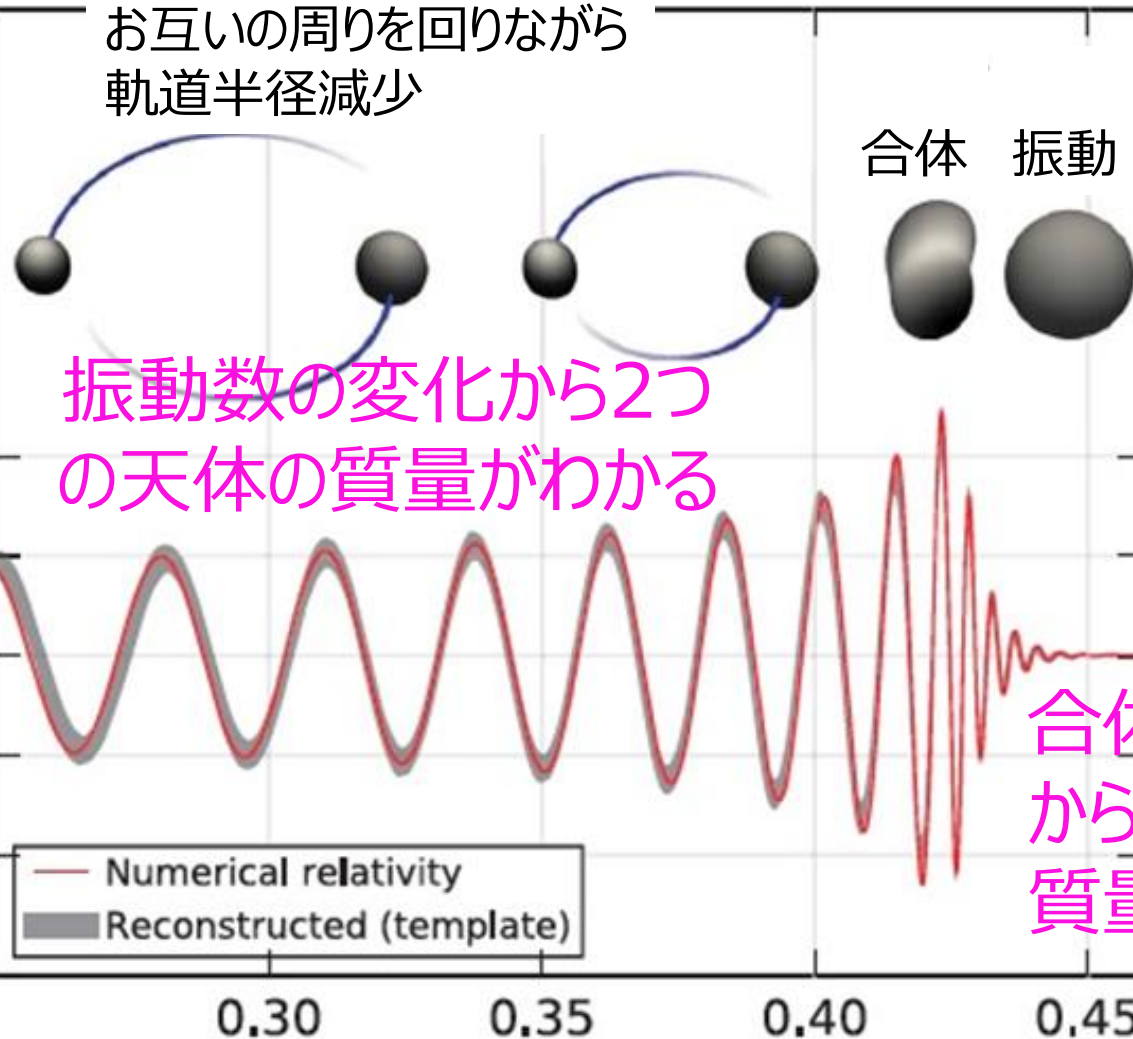


重力波形から何がわかるか？

- 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

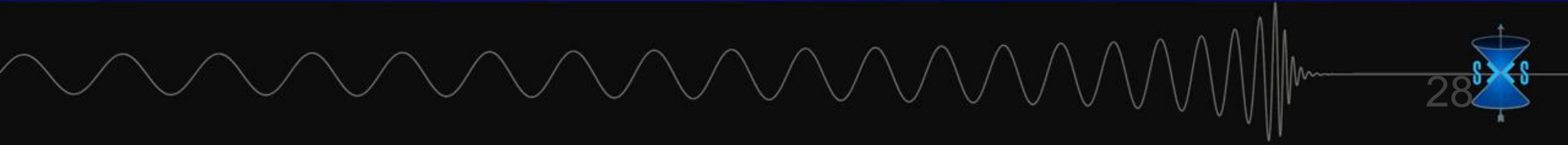
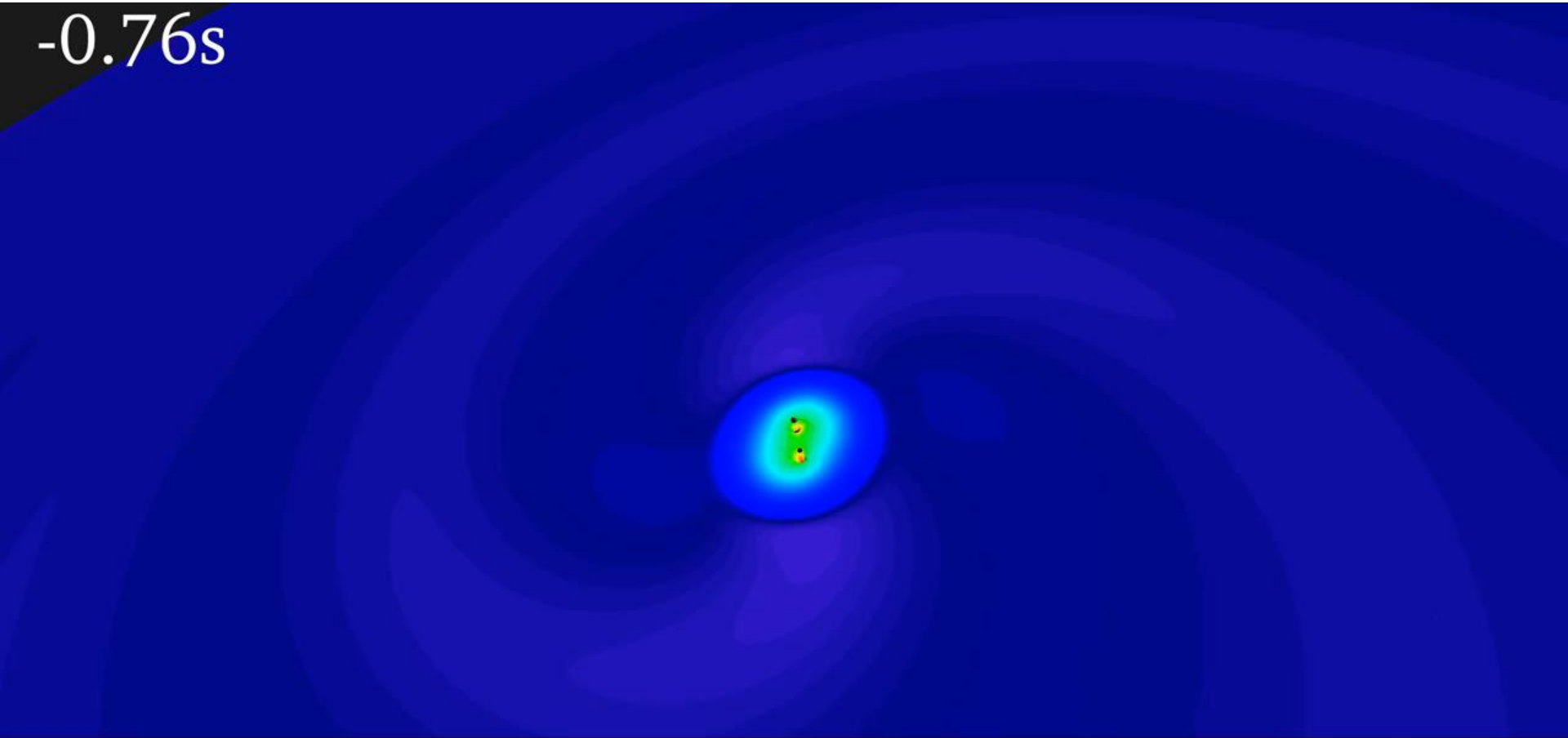
振動数の変化から2つ
の天体の質量がわかる

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

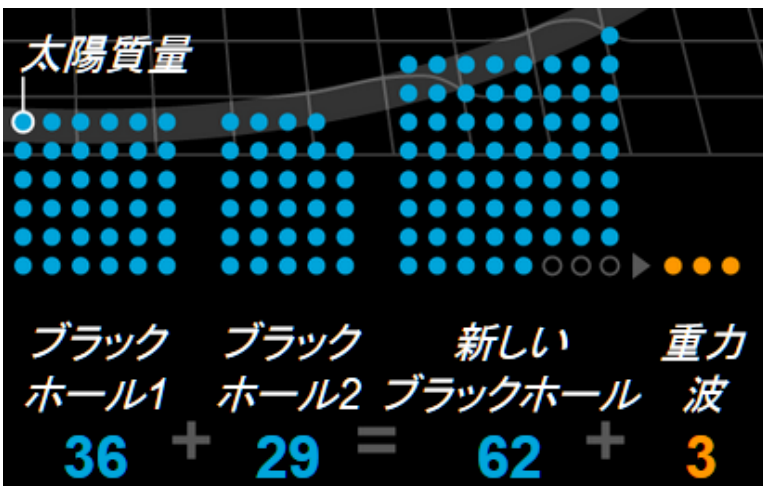


重力波形からわかったこと

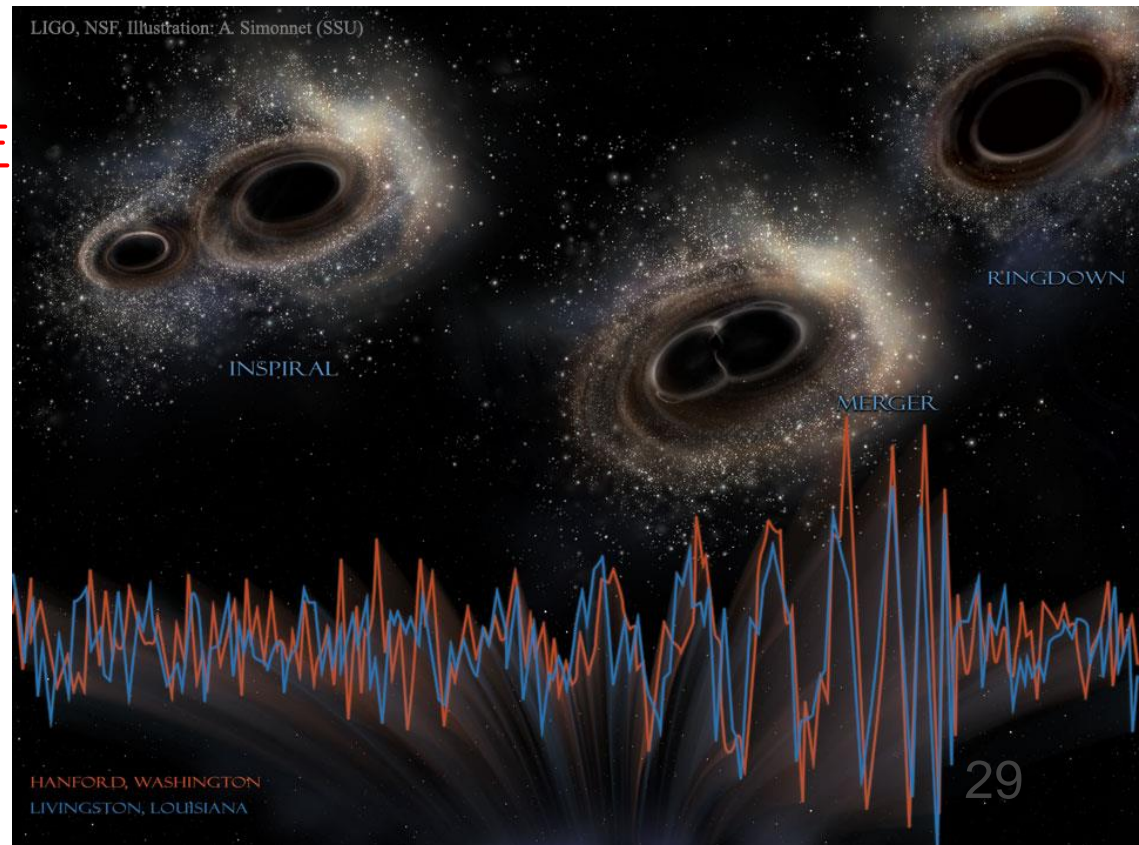
- 太陽質量の**36倍**と**29倍**が合体して **62倍**に(驚き その2)
→ **ブラックホール**と判明 (驚き その3)
- 太陽質量の3倍相当のエネルギーが重力波として放出
- 地球から**13億光年**

エネルギー 質量

$$E = mc^2$$



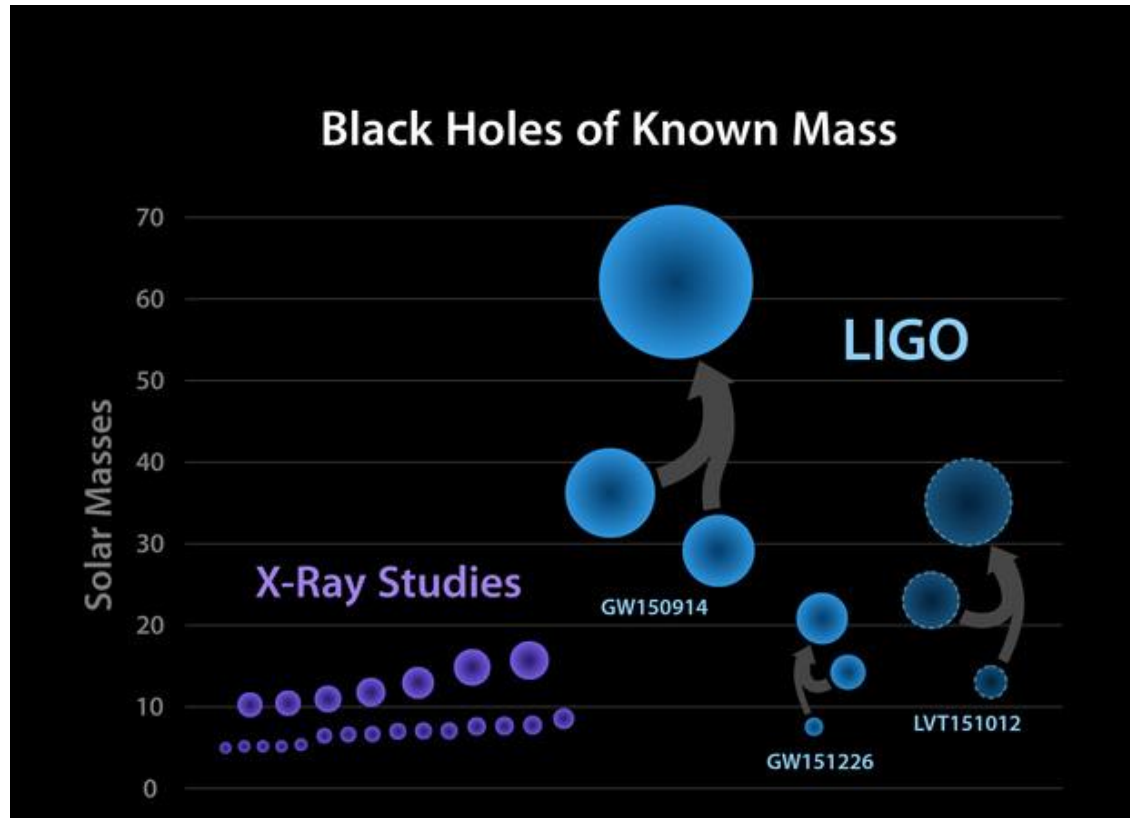
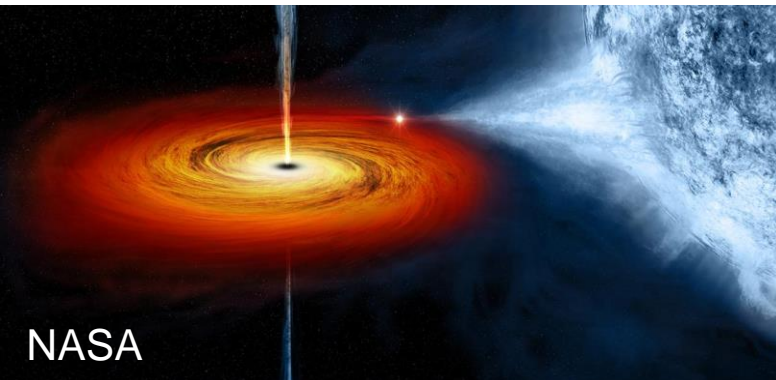
NATIONAL GRAPHIC



ブラックホール質量の謎

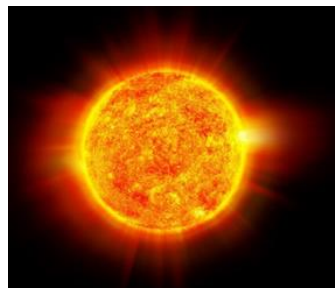
- これまでX線の観測で見つかったブラックホールは高々10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか?

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

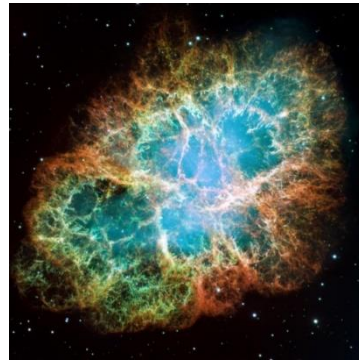


ブラックホールはどうできる？

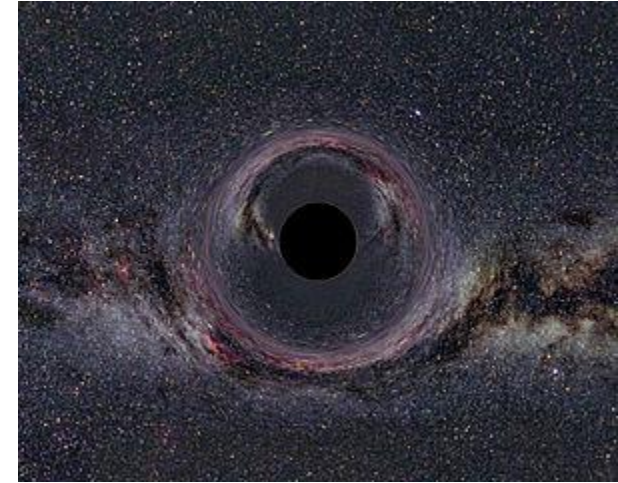
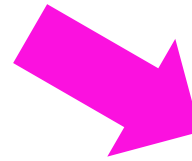
- 普通は10太陽質量程度以下の小さなブラックホールしかできない



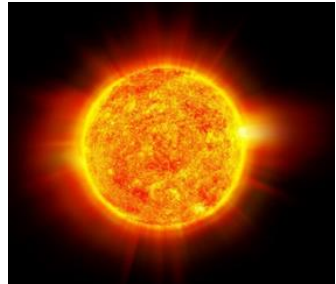
歳を取ると



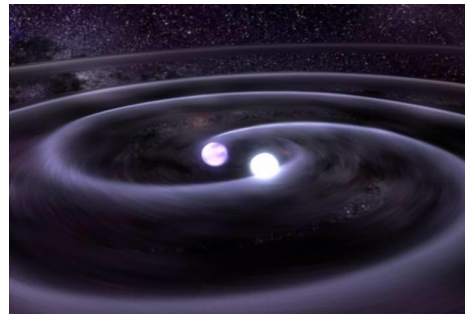
超新星爆発



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)

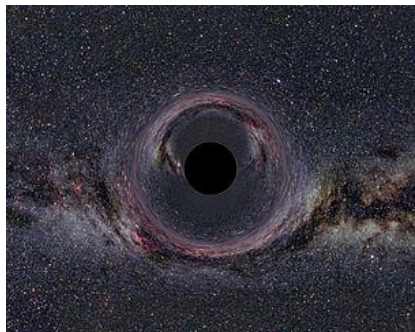
中心にブラックホール



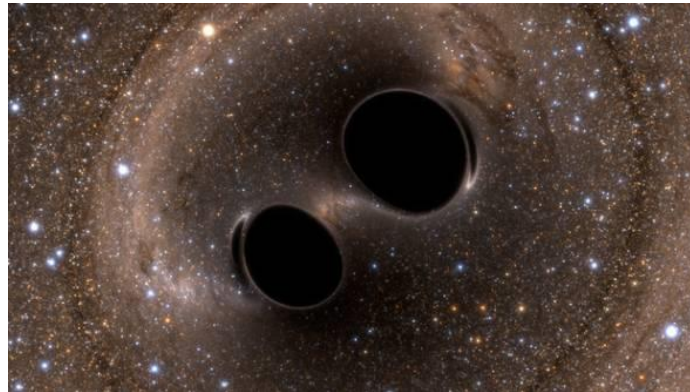
巨大ブラックホールの周りを星たちが回っている

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
中程度のブラックホールが予想よりたくさん？
→ 巨大ブラックホール形成の謎を解く鍵？



10太陽質量以下



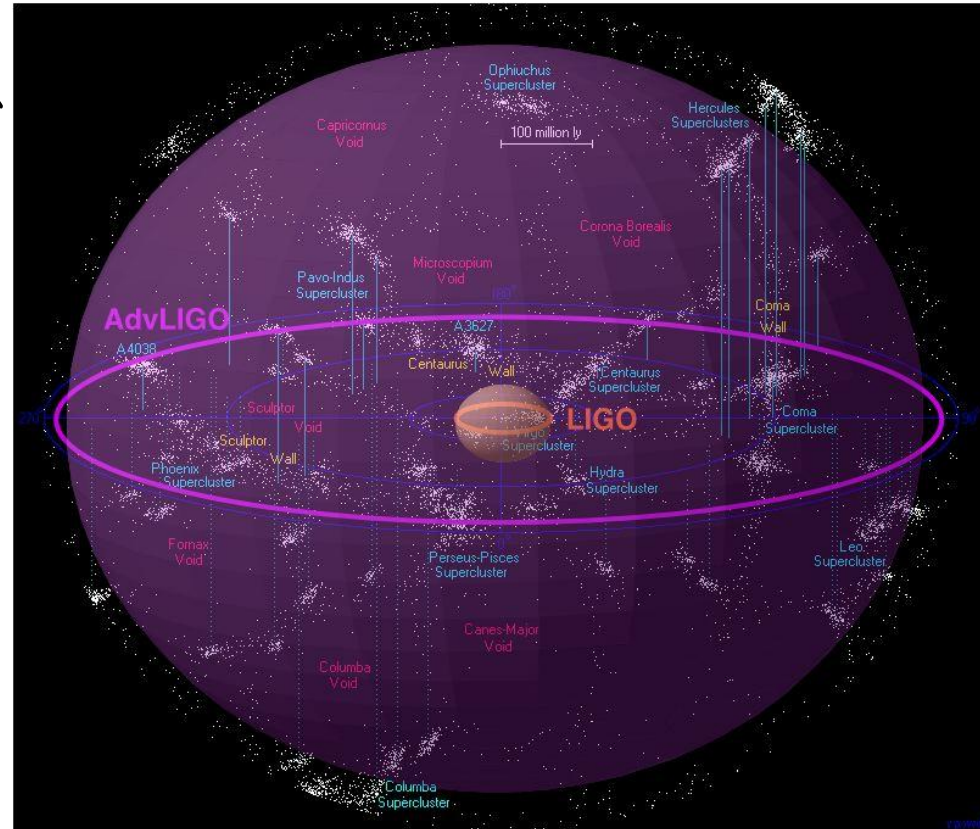
$36+29 \rightarrow 62$ 太陽質量



巨大ブラックホール

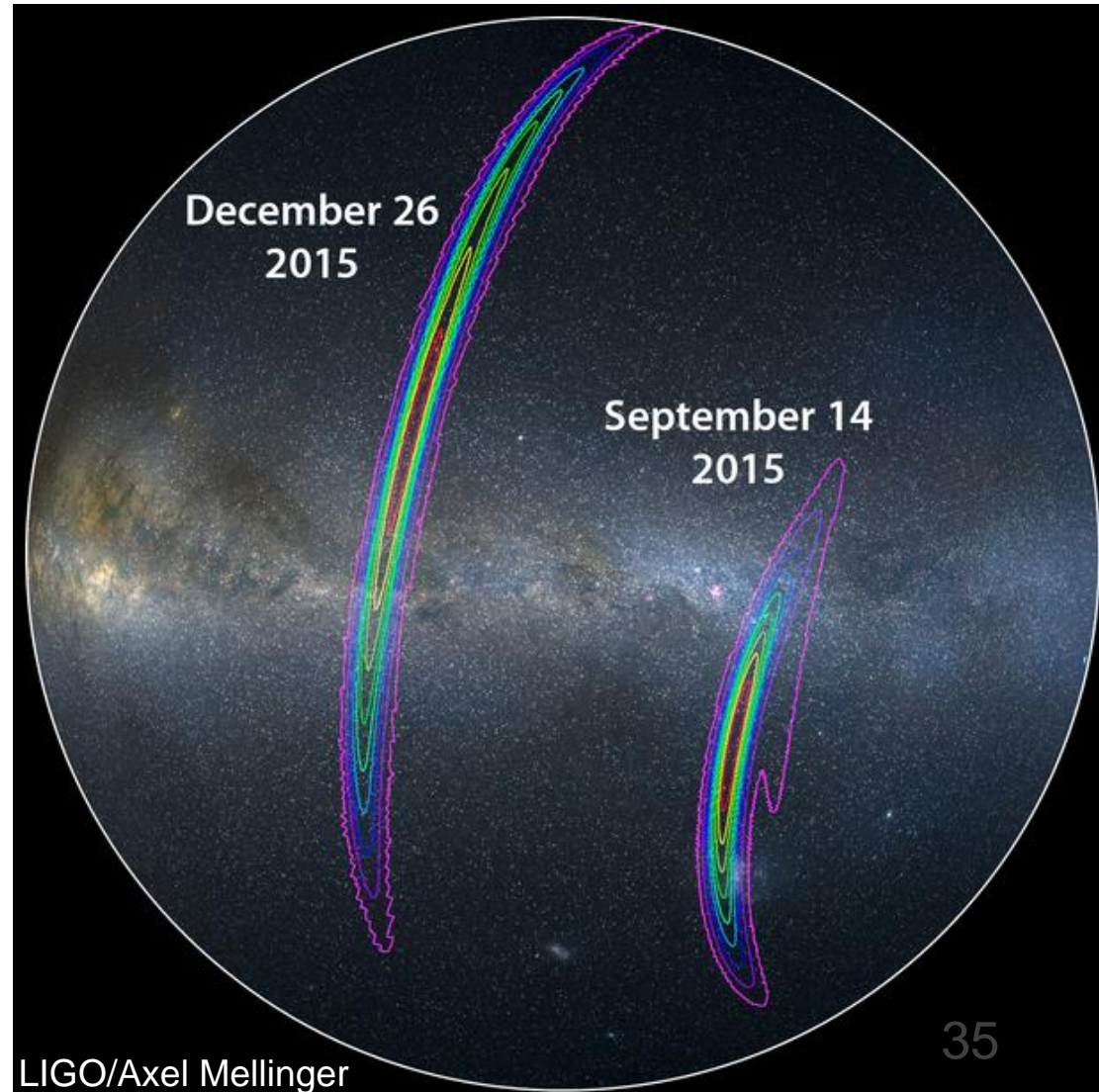
今後の展望

- 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、質量分布や年に何個できるかが精度よくわかる
 - 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**到来方向があまり特定できない**
- 電磁波(電波、光、X線、 γ 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

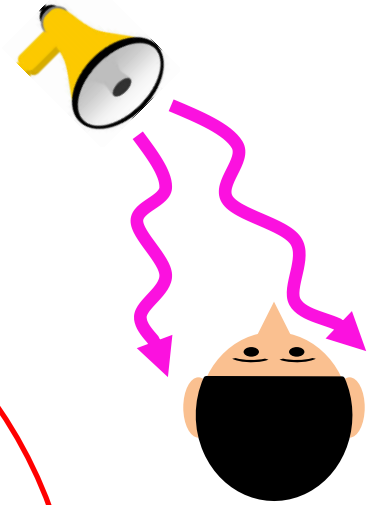
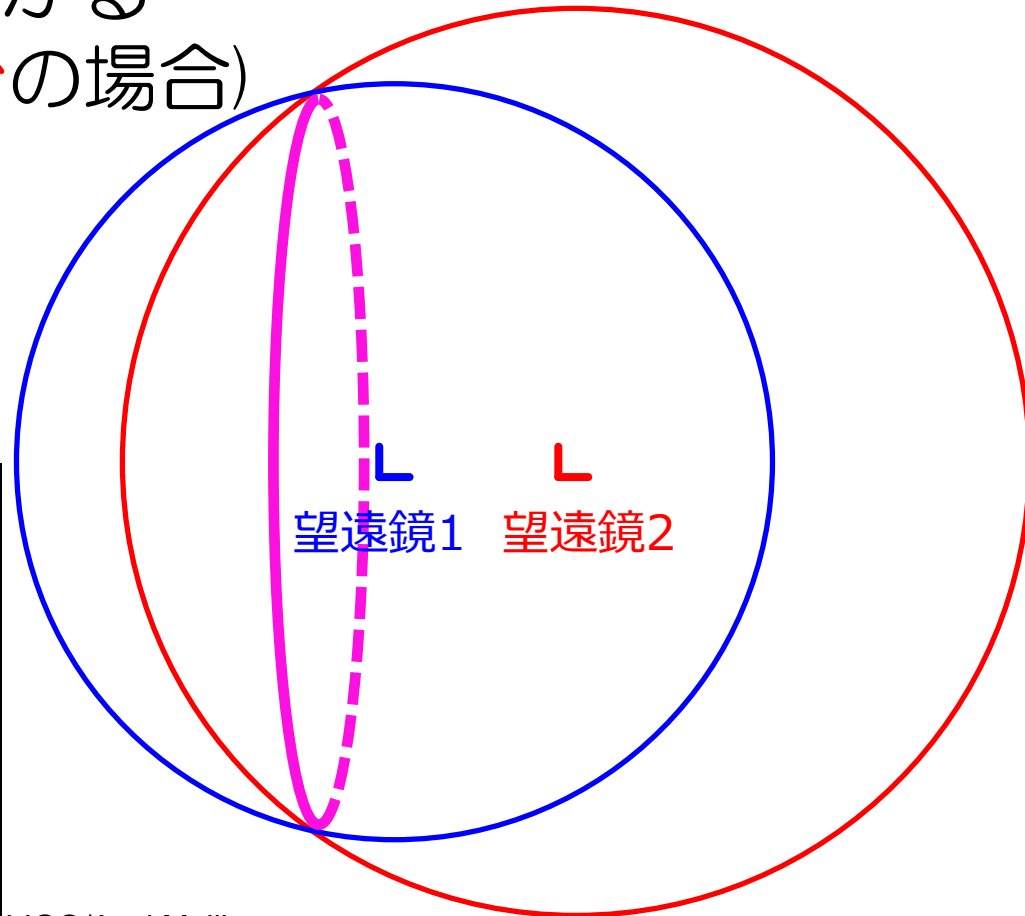


到達時刻にわずかな差が生じる

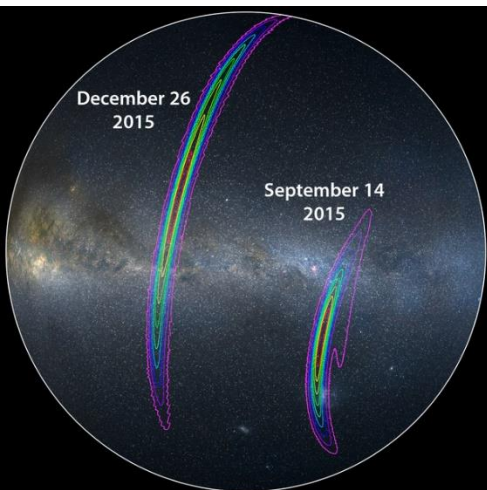
波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

円周上のどこからか
あることはわかる
(望遠鏡が**2台**の場合)



人間の耳
と同じ

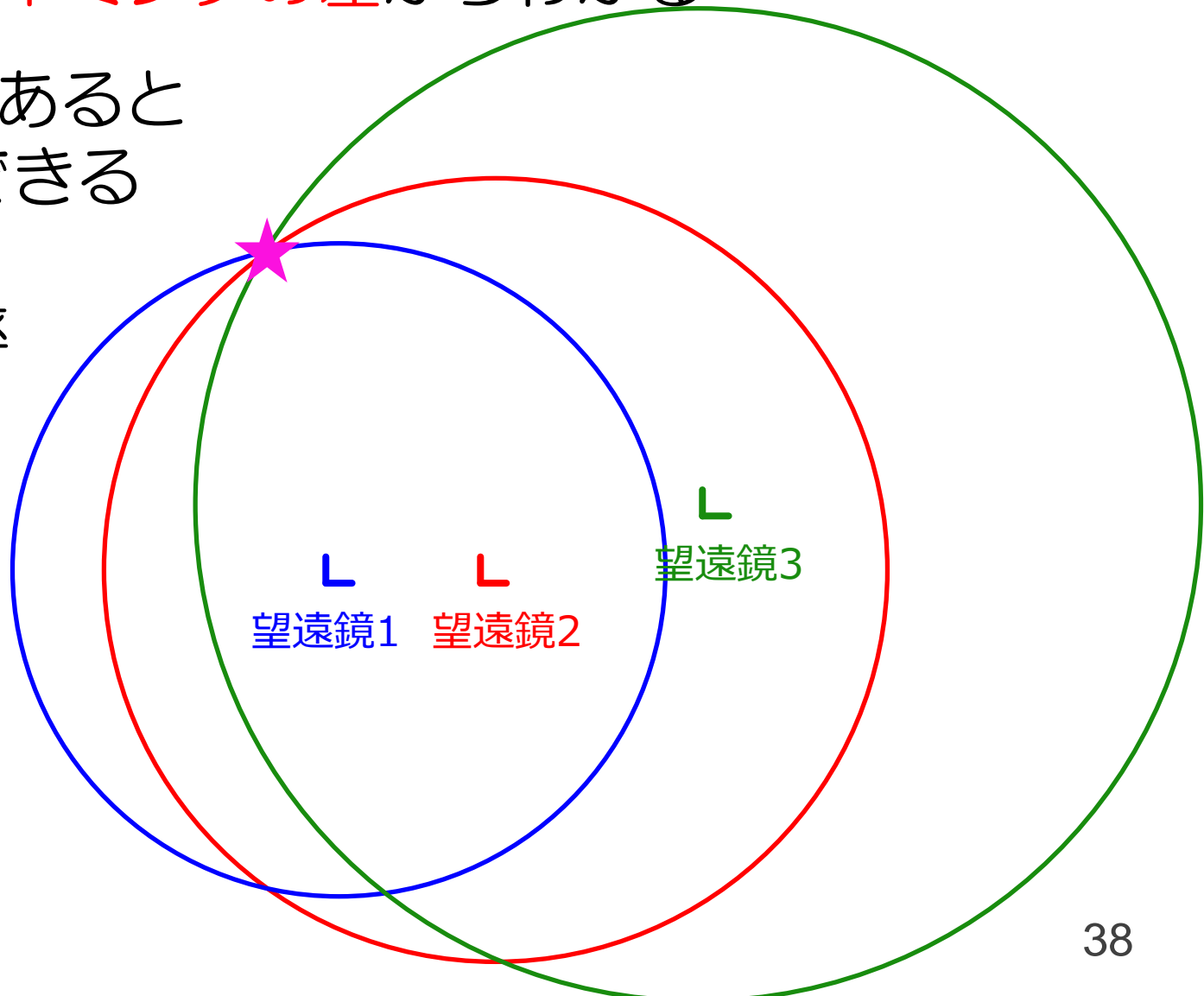


波源の特定方法

- 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



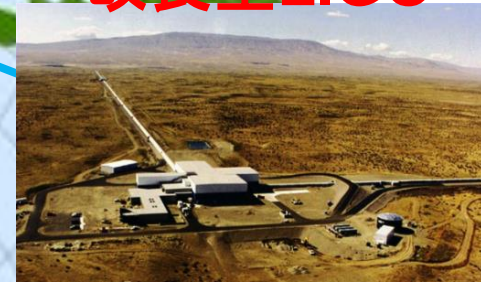
世界の重力波観測ネットワーク

- 各国で建設・改良が進行中

改良型LIGO
(初検出後、改良中)



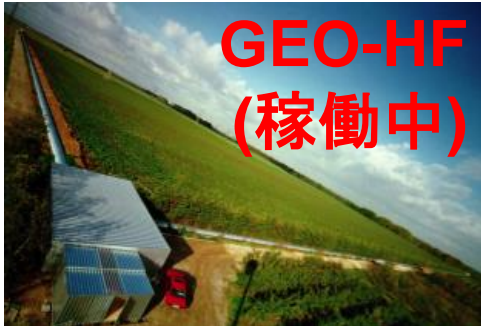
改良型LIGO



KAGRA
(建設中)



GEO-HF
(稼働中)



改良型Virgo
(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



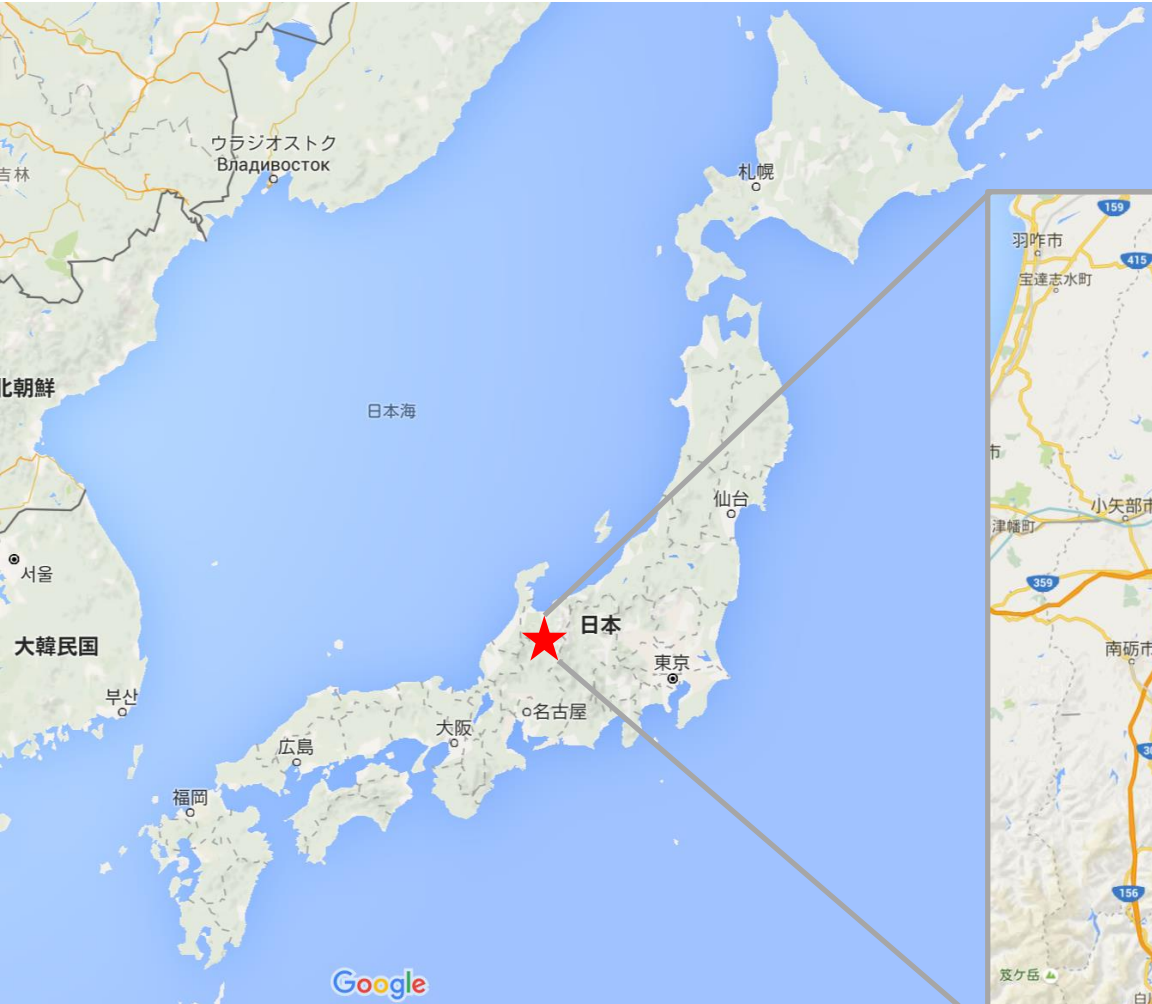
などなど

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)

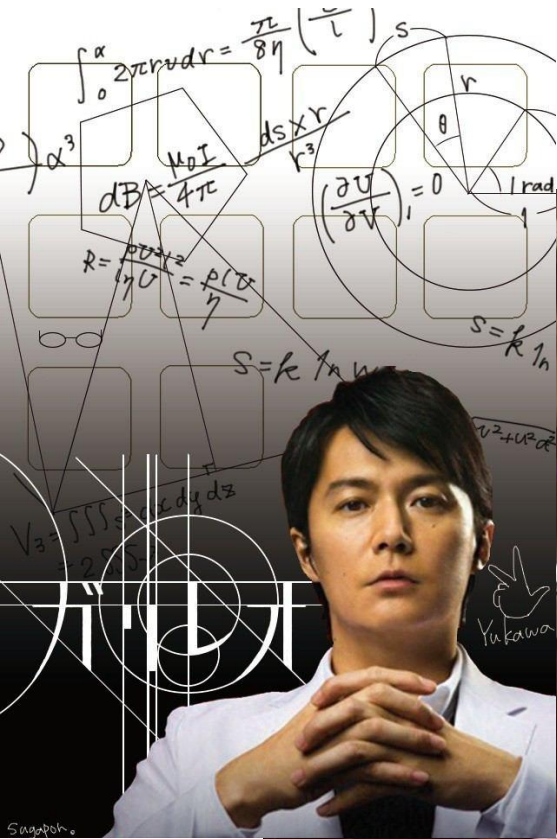
地下での作業

- 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

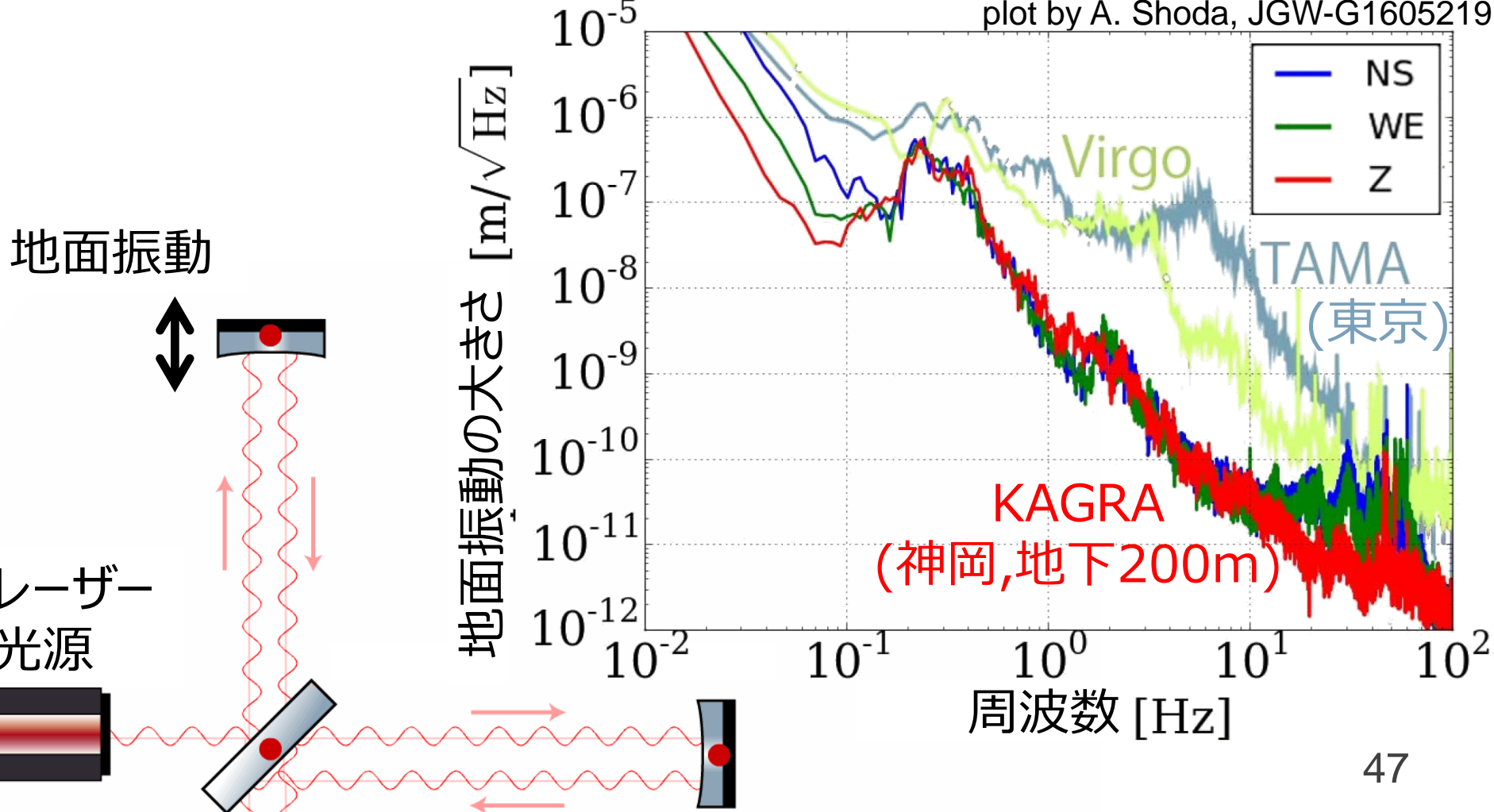
- 思ったのと違う！



なぜ地下なののか？

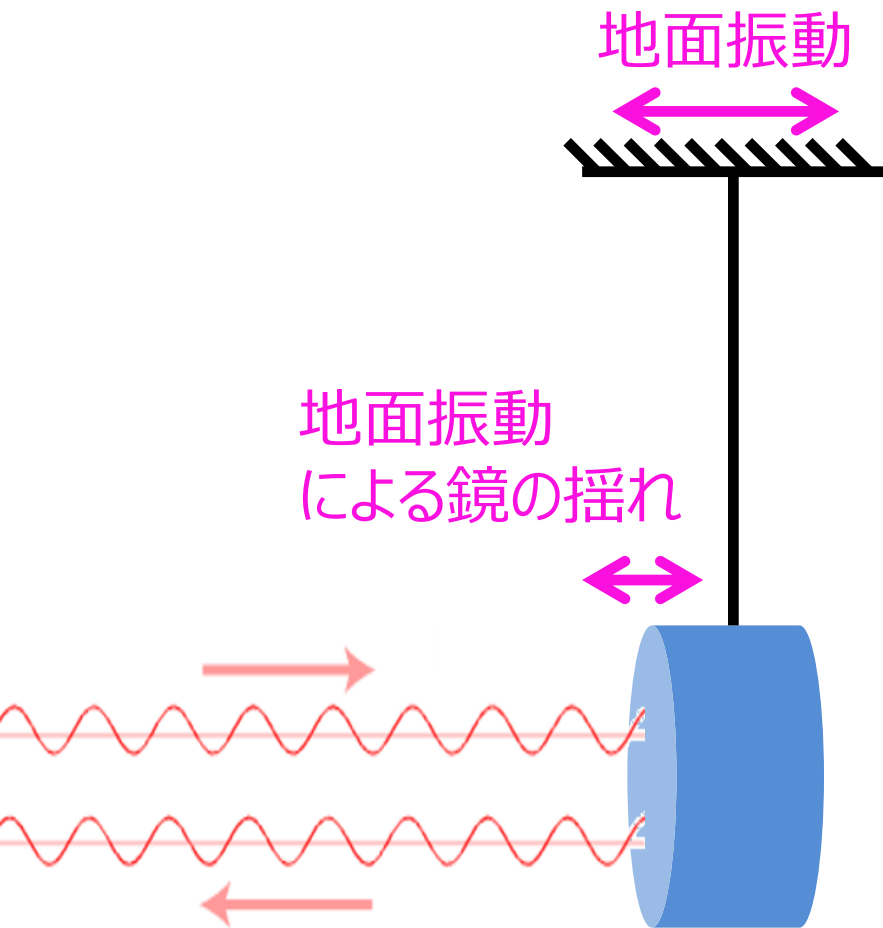
- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



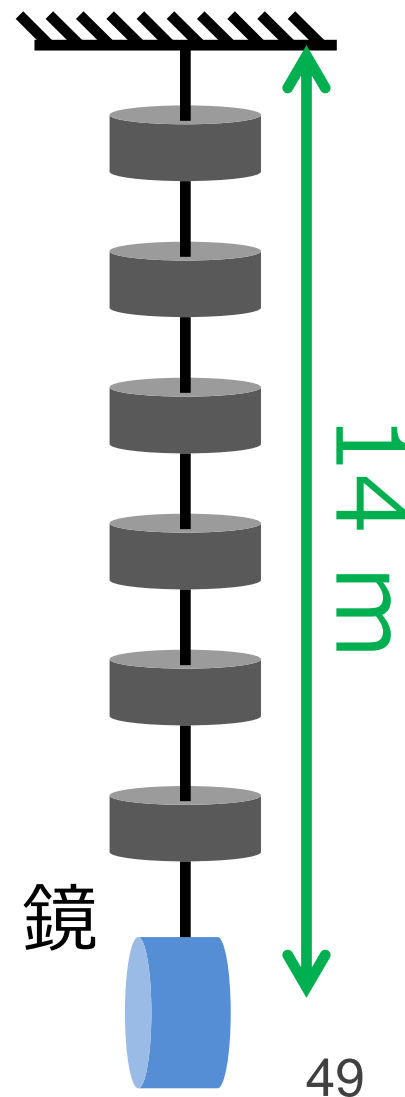
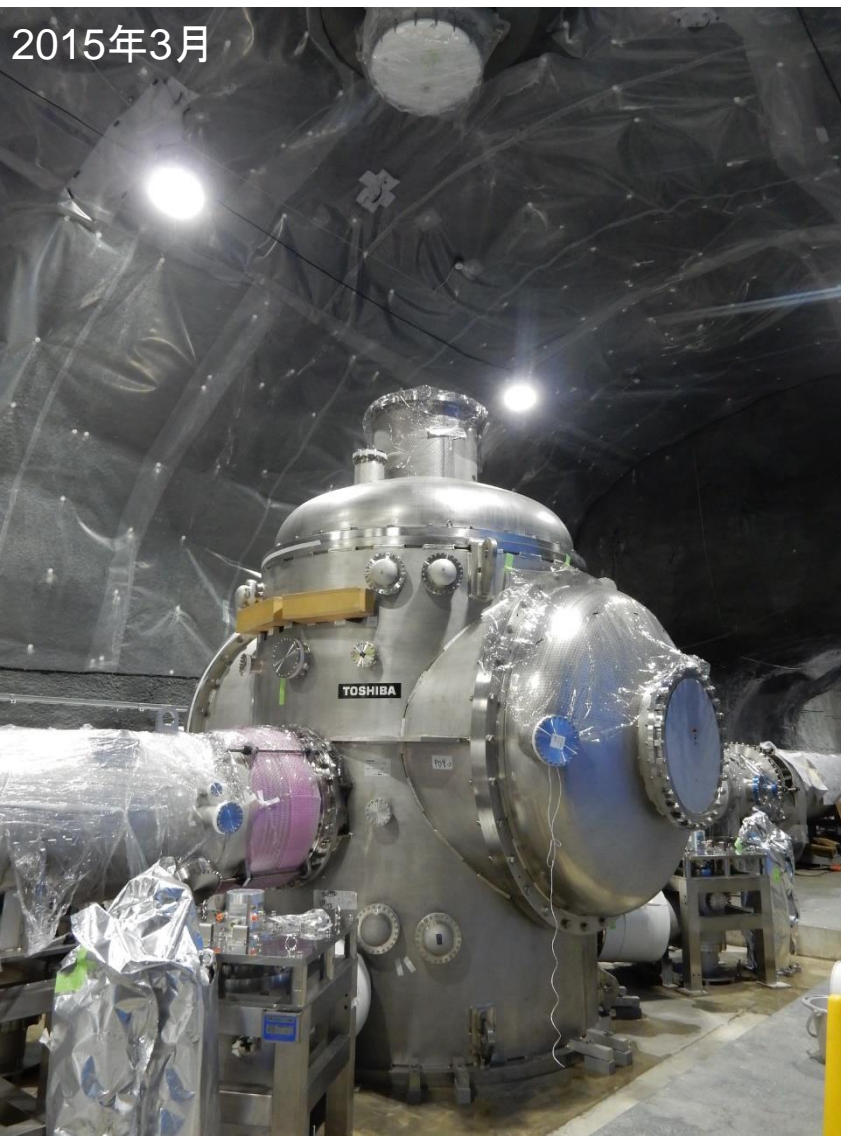
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)

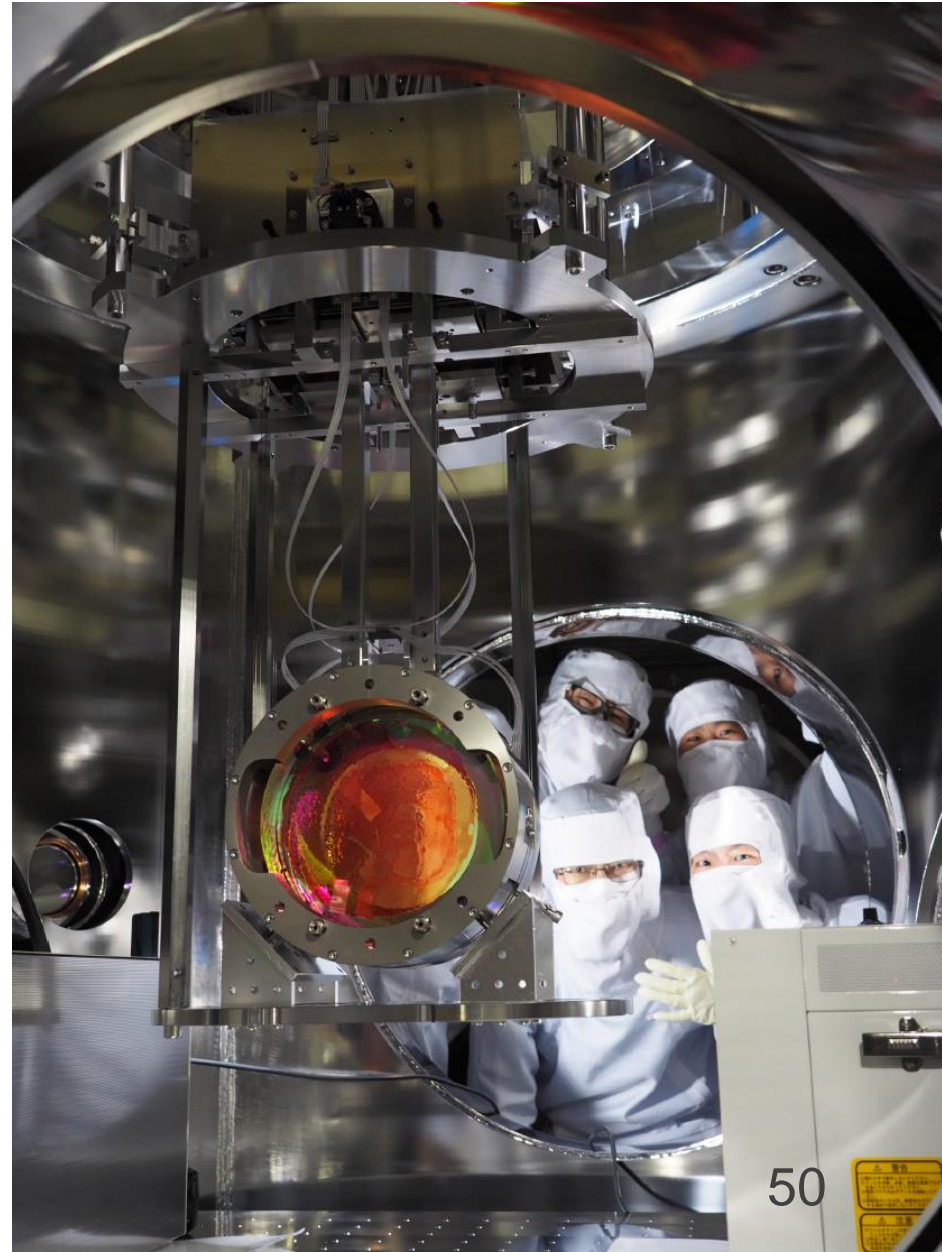
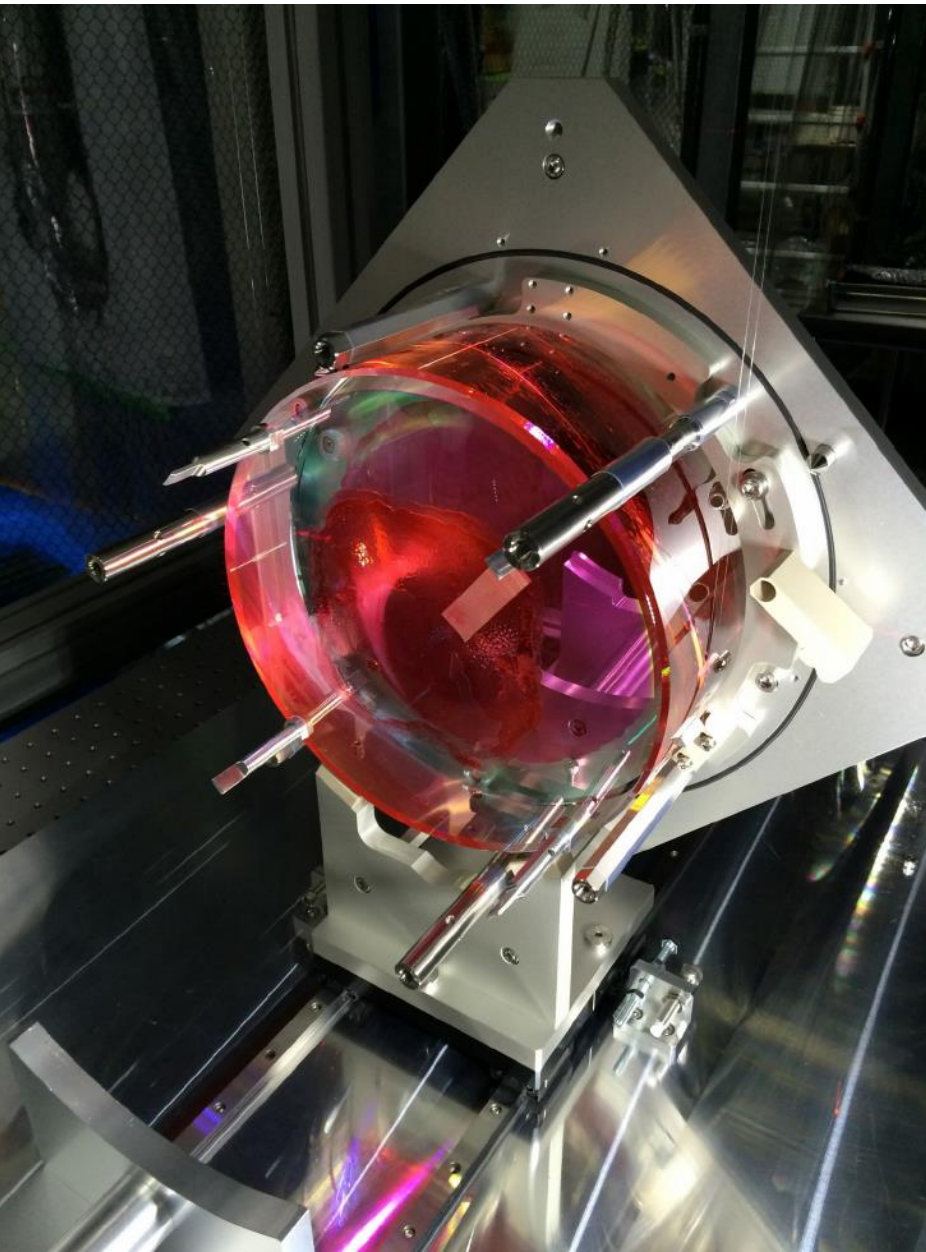


KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

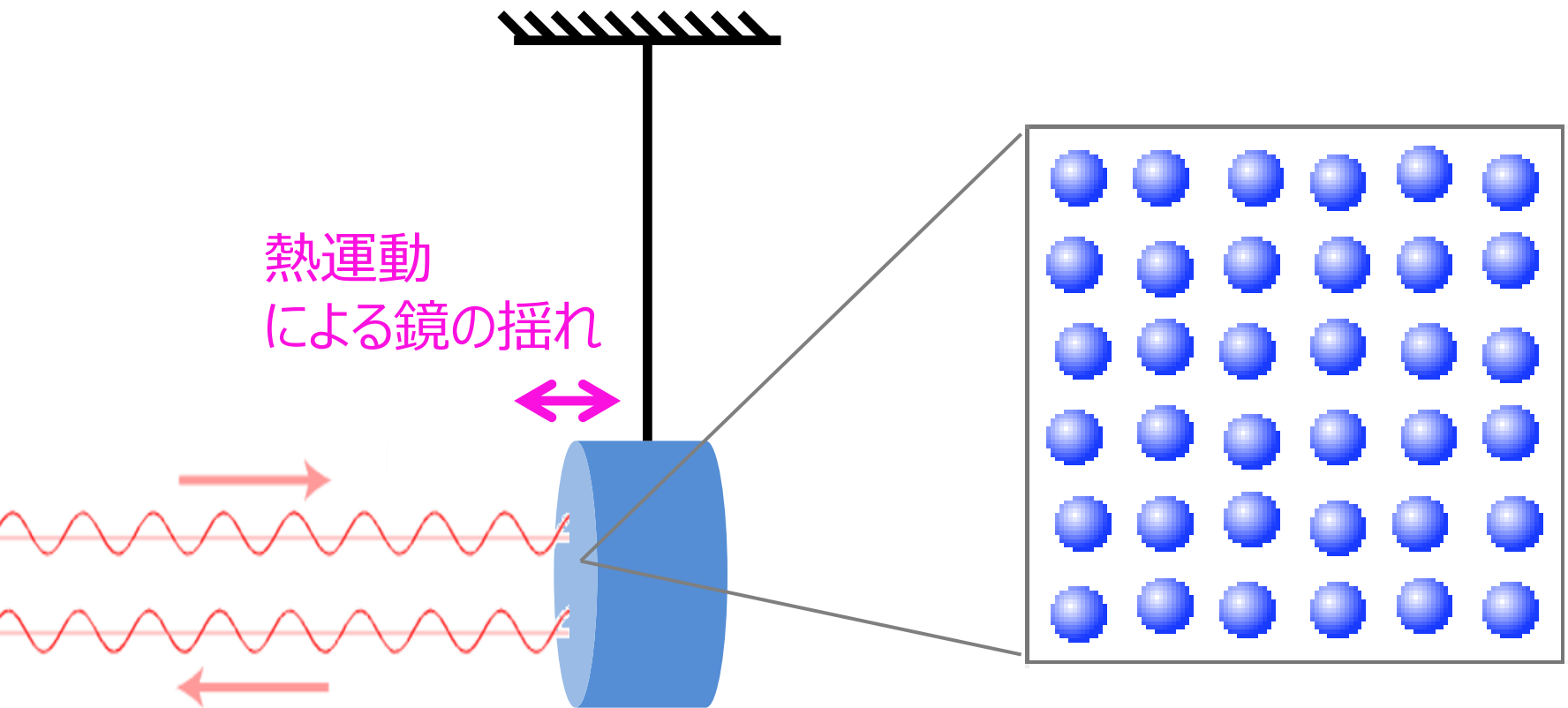


KAGRAの鏡の防振装置



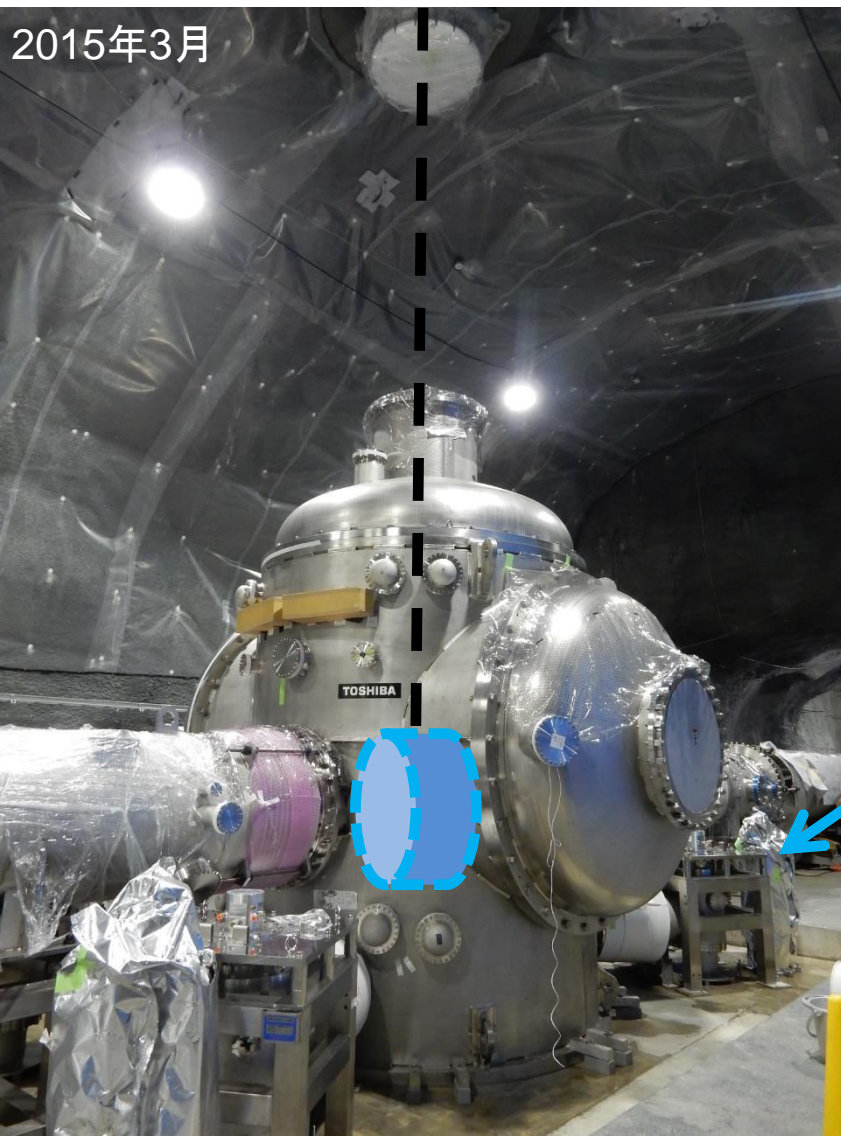
鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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°C まで冷やすことで熱運動を小さくする

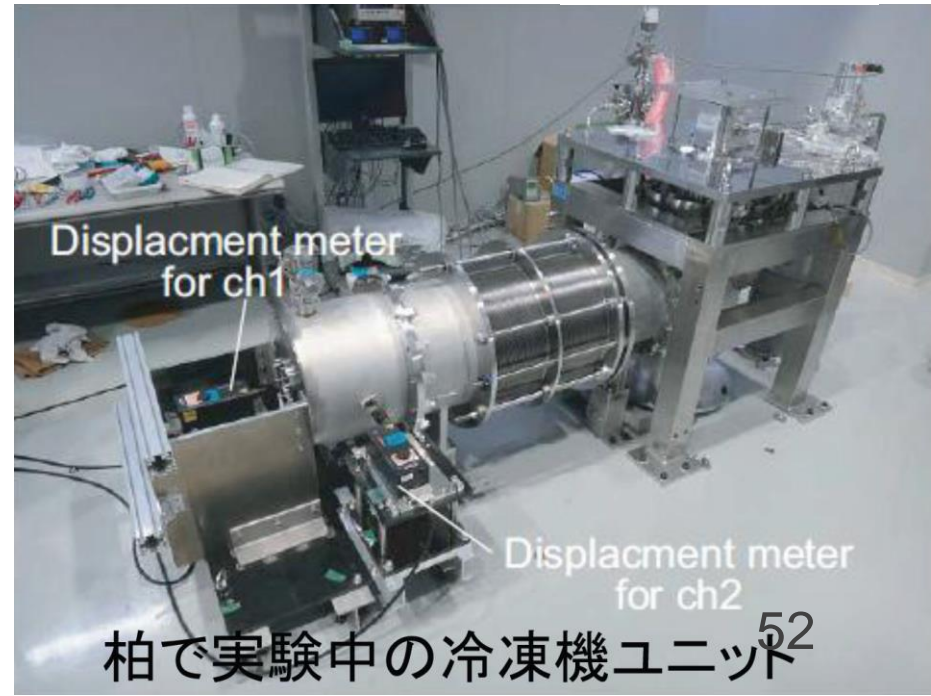


KAGRAの低温装置

- 最低振動の冷凍機を開発

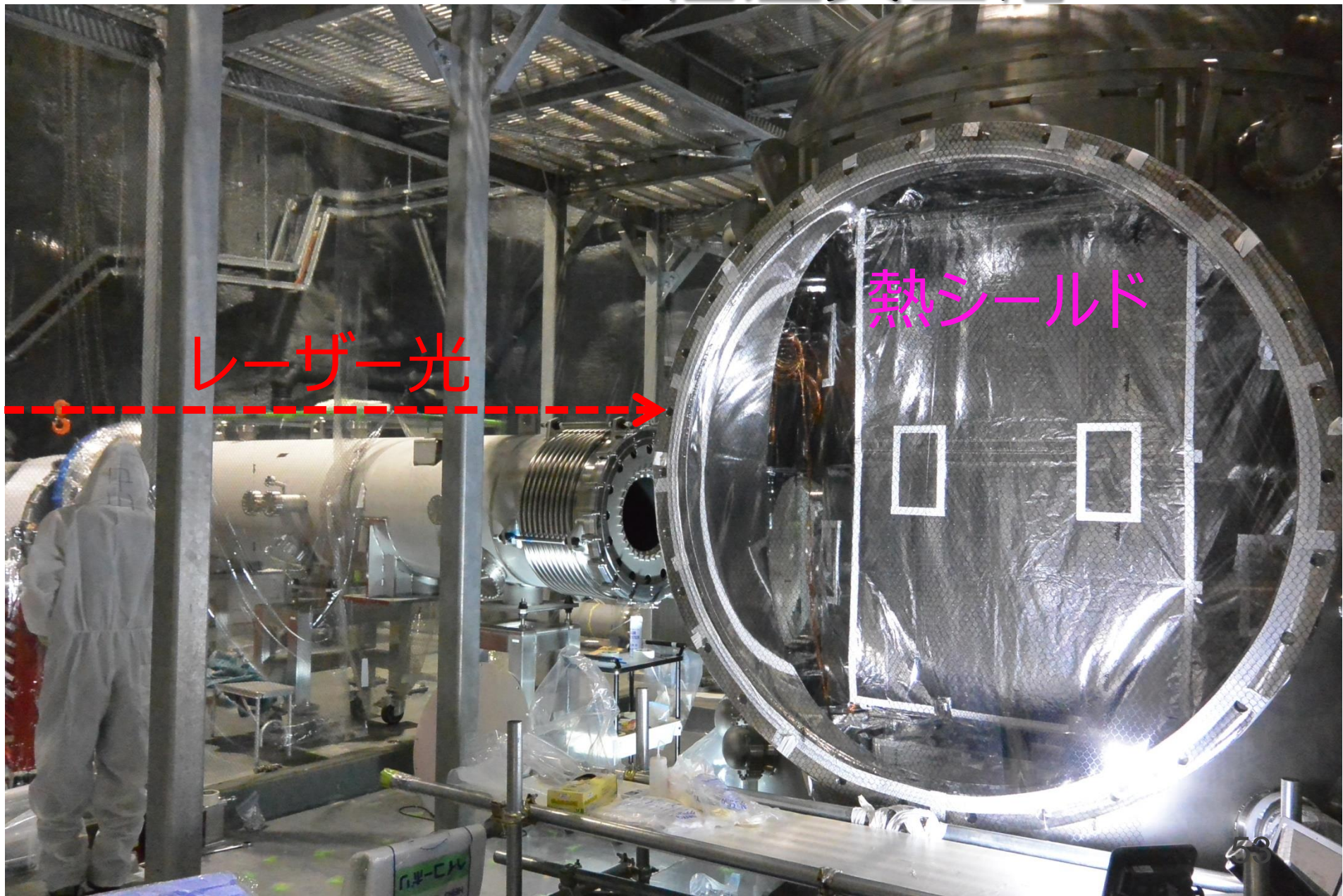


冷凍機



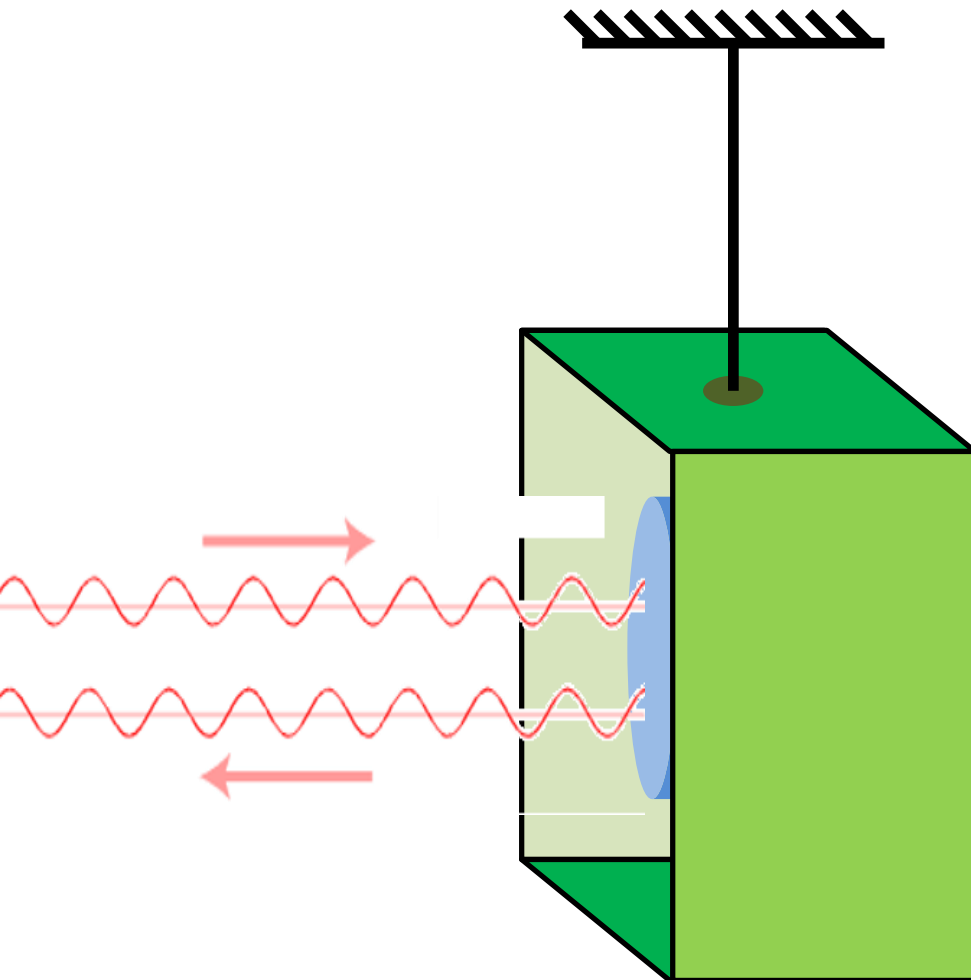
柏で実験中の冷凍機ユニット⁵²

KAGRAの低温真空槽



KAGRAの低温真空槽

- レーザー光を反射させるために穴が必要
- 「冷蔵庫を開けながら冷やし続ける」技術



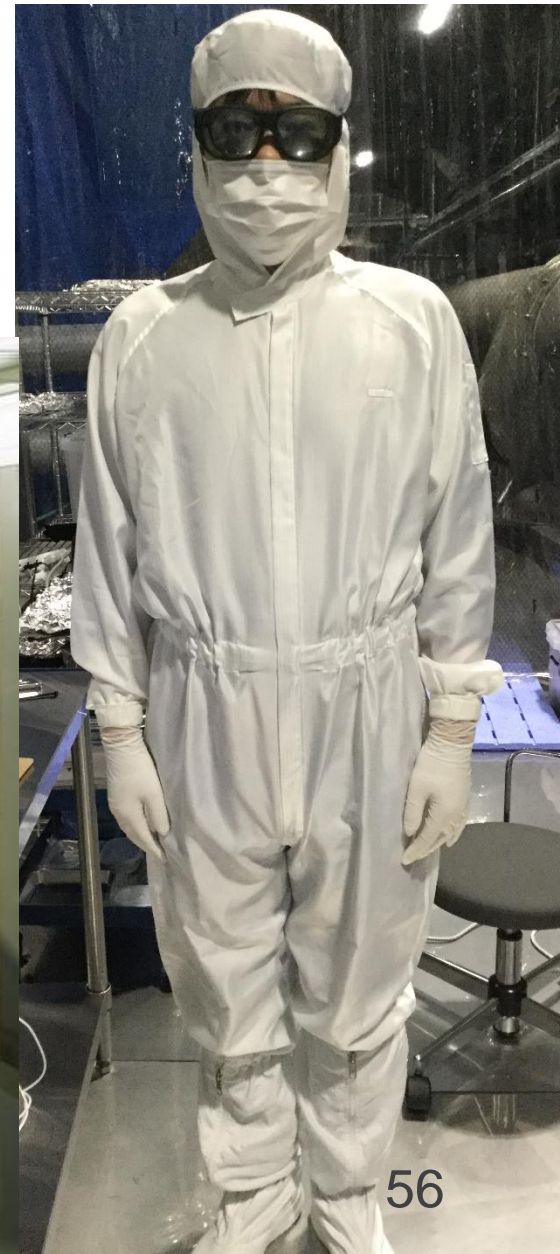
KAGRAの鏡

- 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



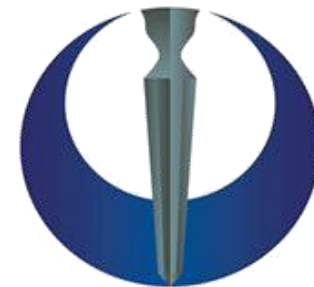
KAGRAのクリーン環境

- 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

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



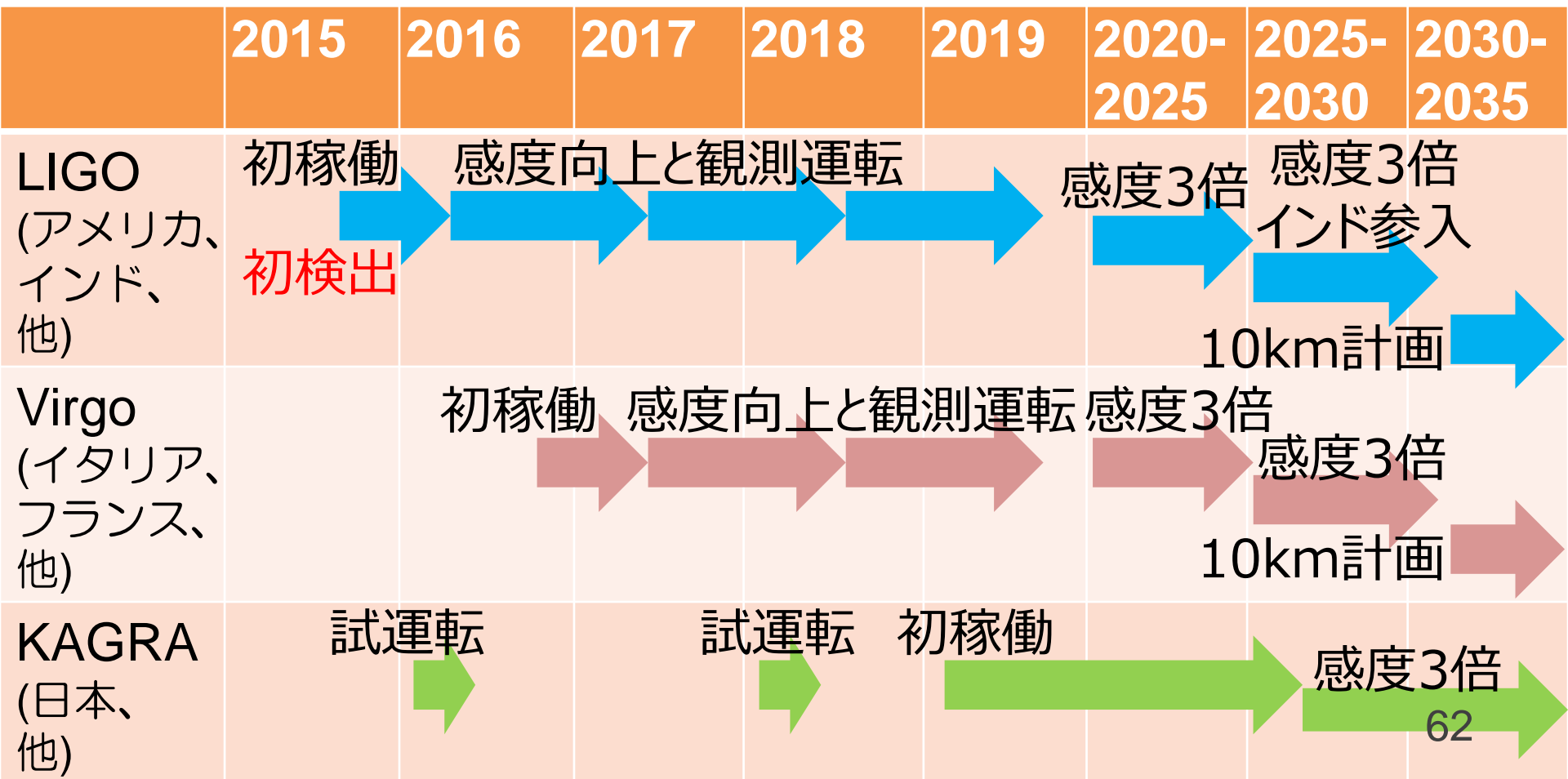
KAGRAの現在の状況

- 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 63

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



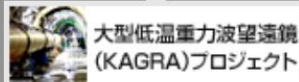
English

いま貢献していただけること [プロジェクトをさがす](#)

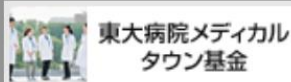
大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) プロジェクト

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