

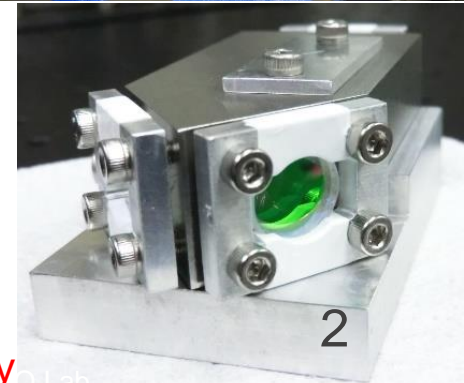
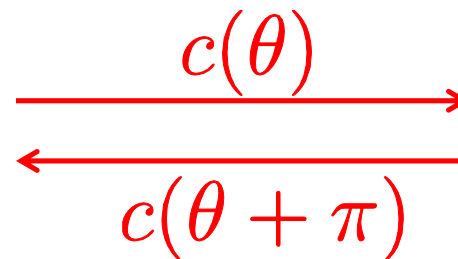
重力波の初検出とこれから

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

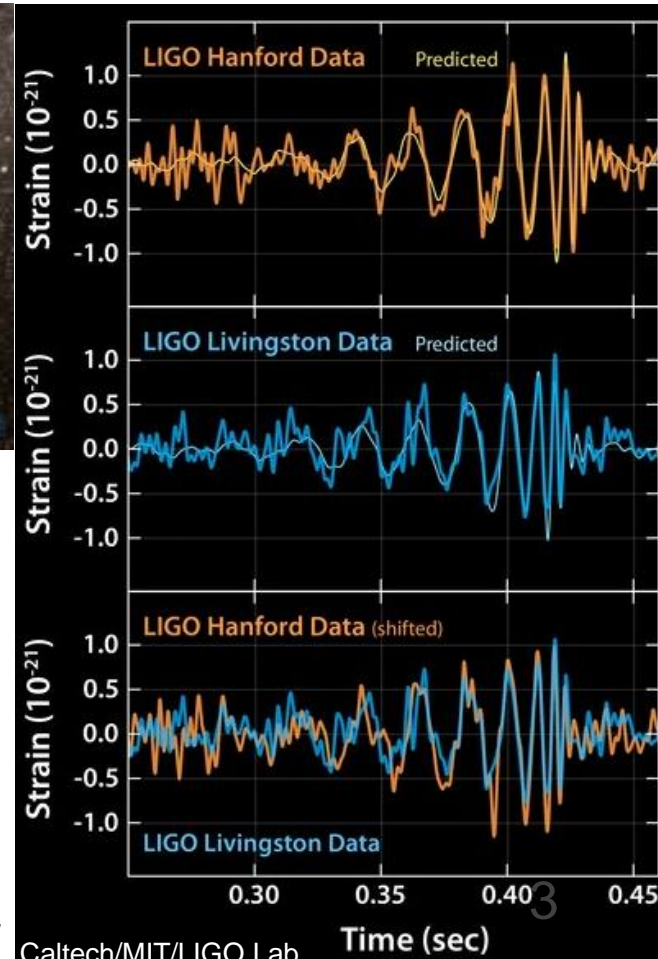
- 安東研究室 助教
- 重力波望遠鏡KAGRA
主干涉計の設計・開発
- ローレンツ不変性の検証
非対称光リング共振器を用いた
片道光速の等方性検証
- 「干渉計を用いた基礎物理」
巨視的量子力学
重力逆二乗則の検証
ダークマター探索



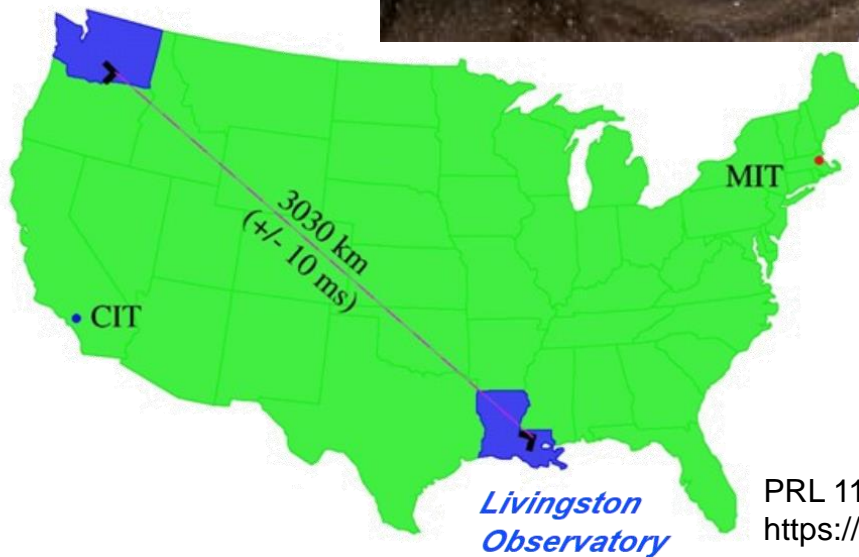
optical ring cavity

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



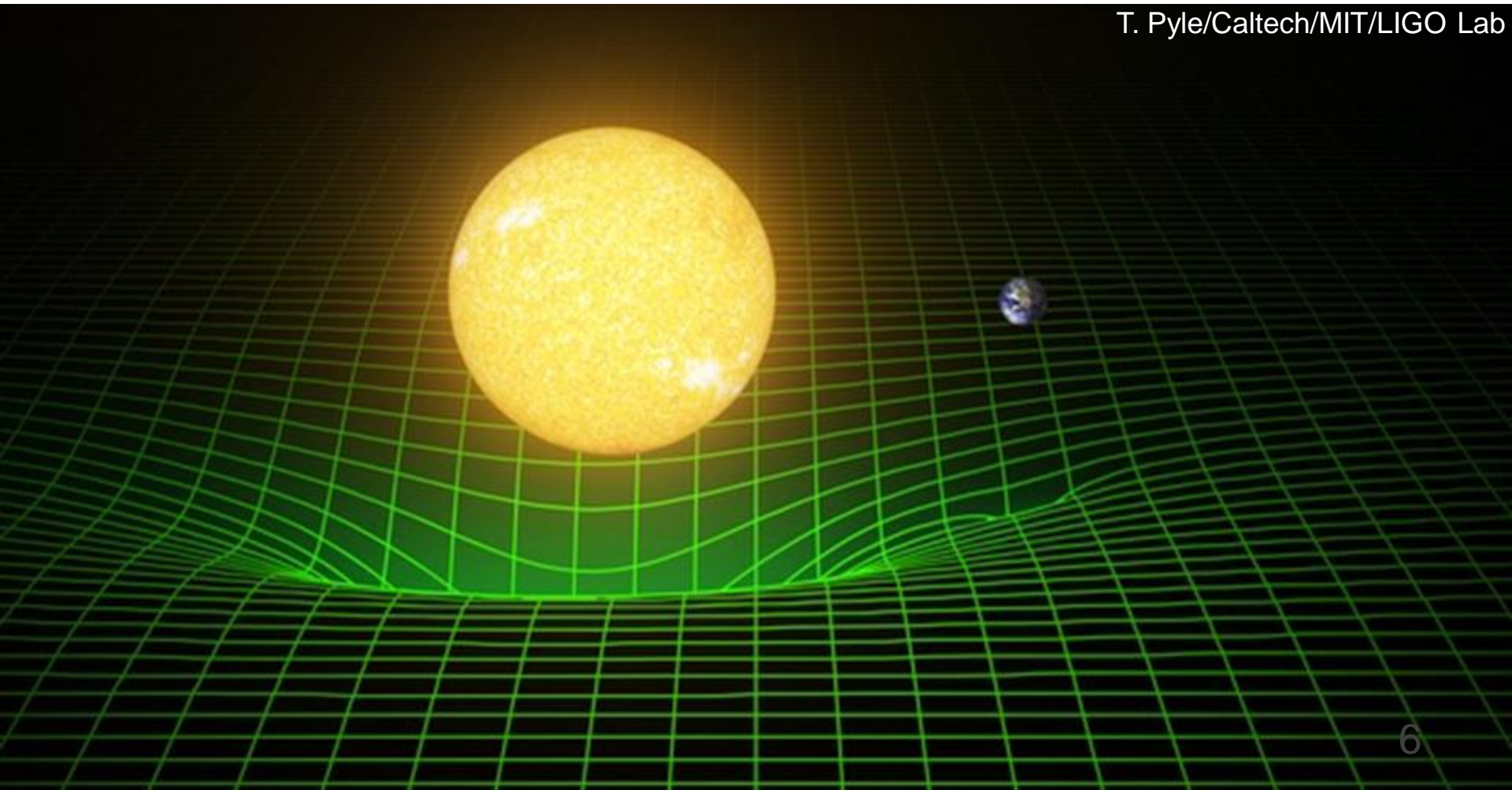
今回のお話

- **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
- 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

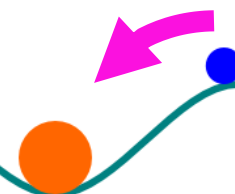
なにもないトランポリンは平ら



ボールを置くと
トランポリンが歪む

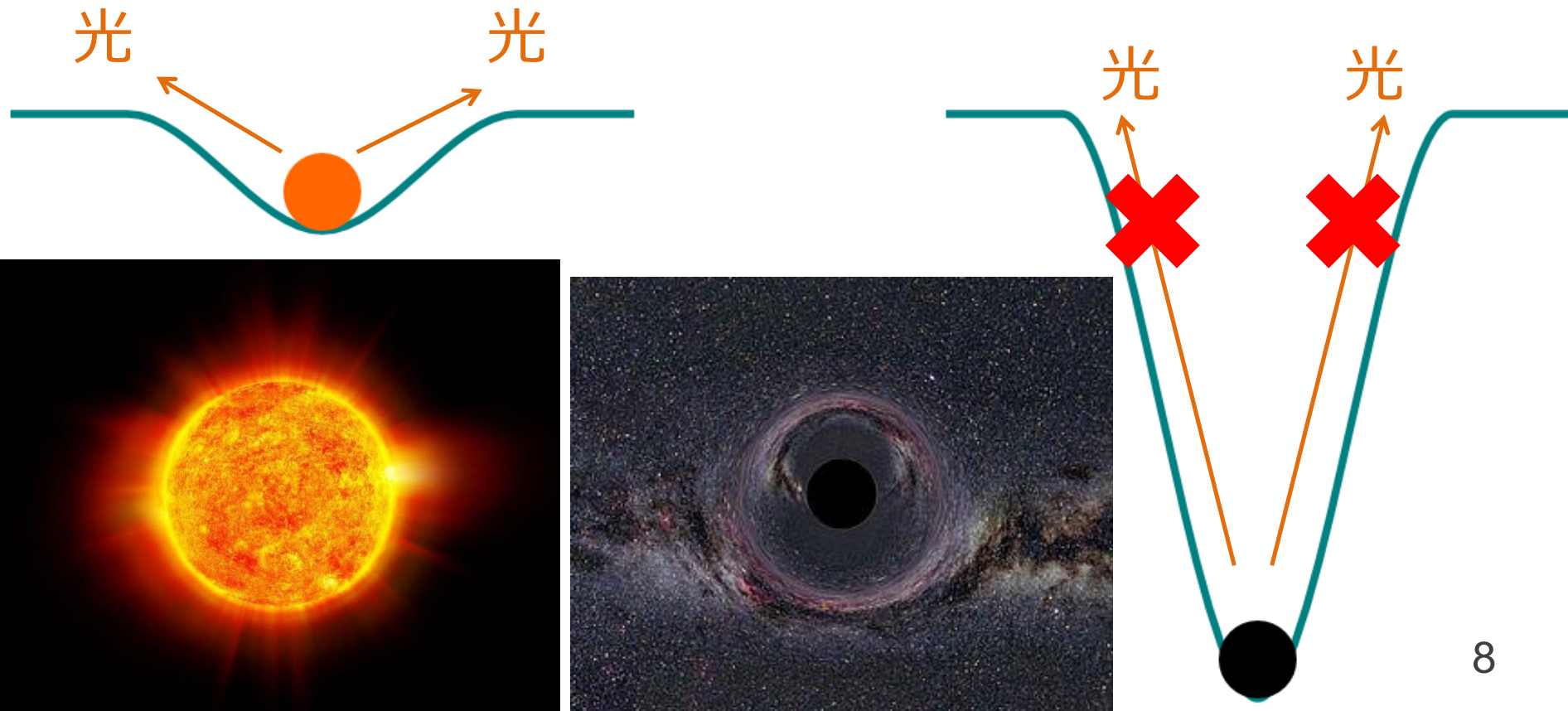


近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる



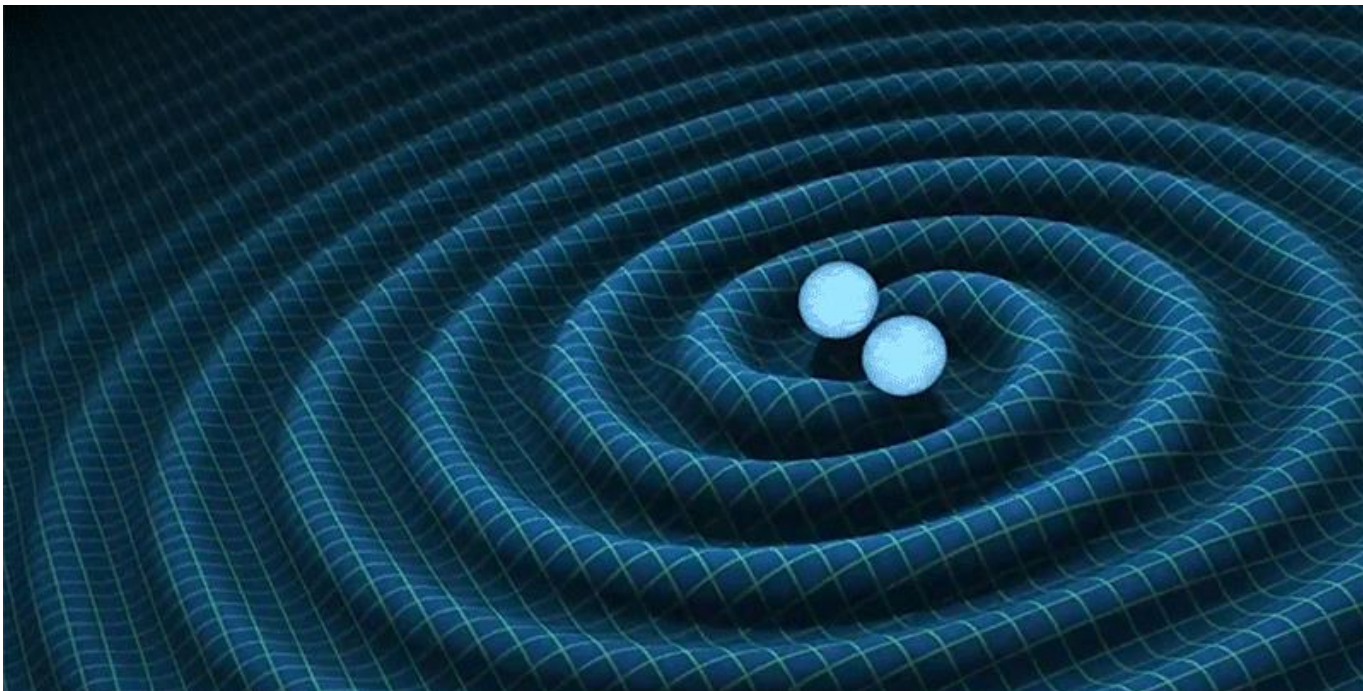
ブラックホール

- 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



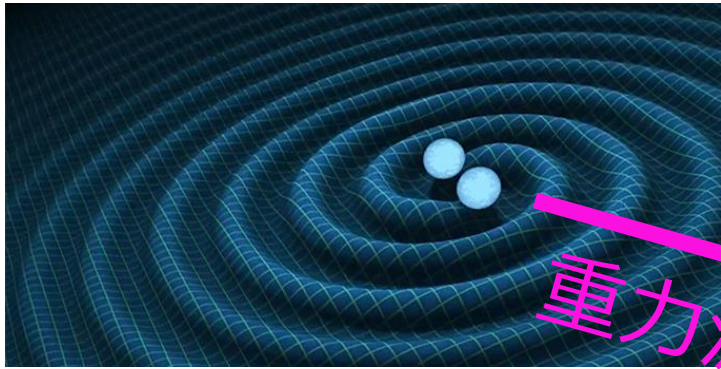
重力波は「時空のさざ波」

- 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

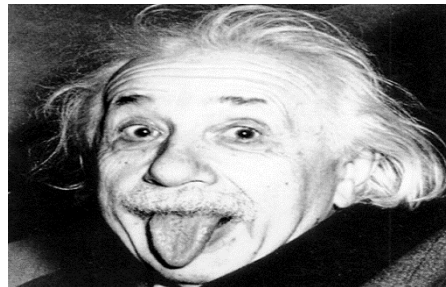
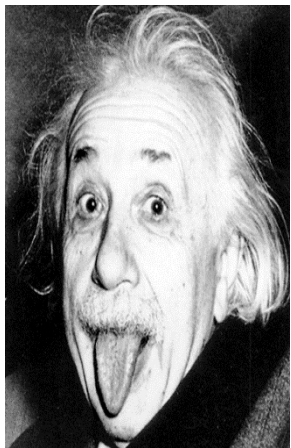
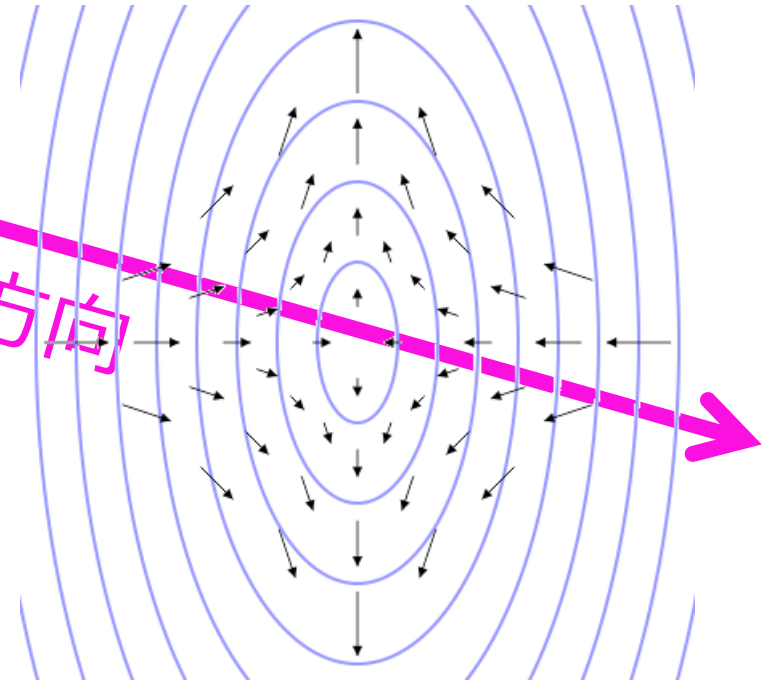


重力波の特徴

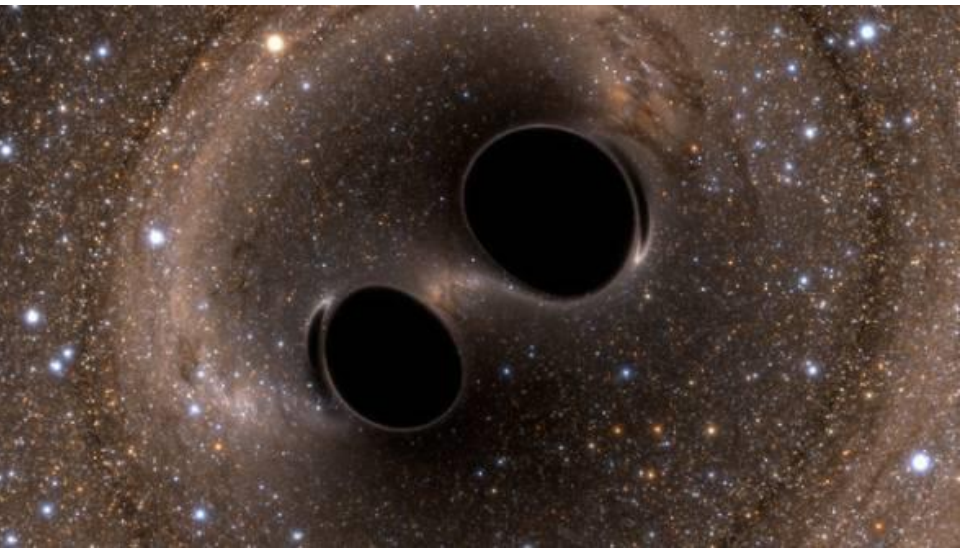
- 縦方向が伸びると、横方向が縮む
- 何にも遮られない (透過性が高い)



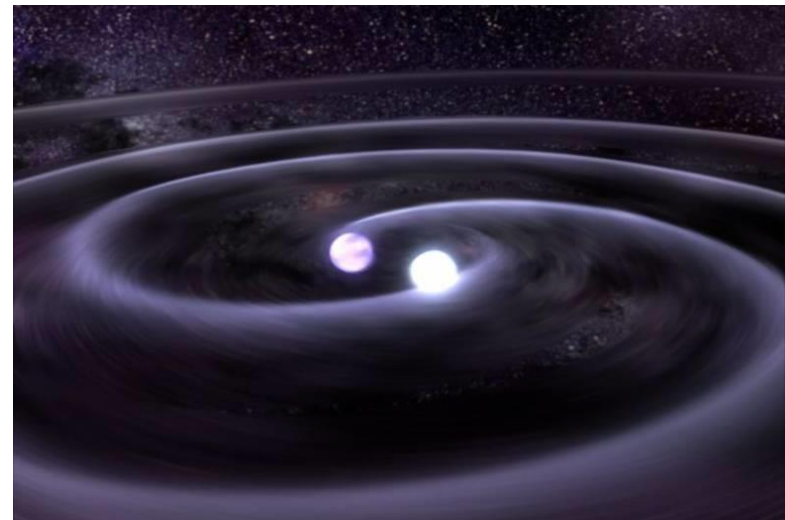
重力波の伝わる方向



重力波源となり得る天体現象



ブラックホール連星

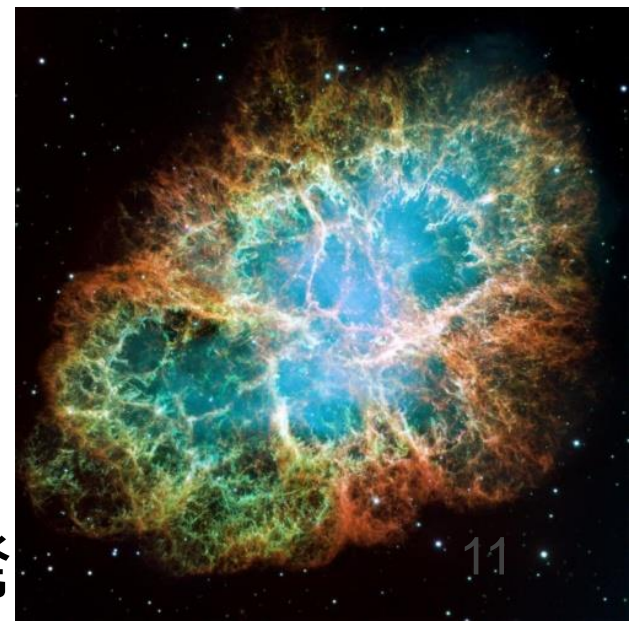


中性子星連星



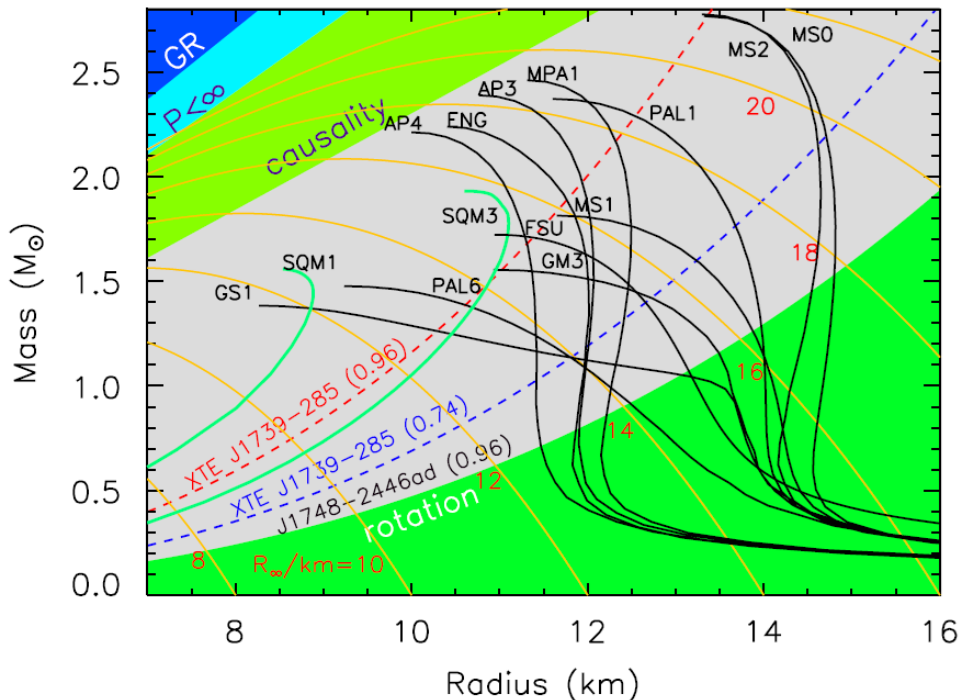
非軸対称な
回転中性子星

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
中性子星の状態方程式の決定
- **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？

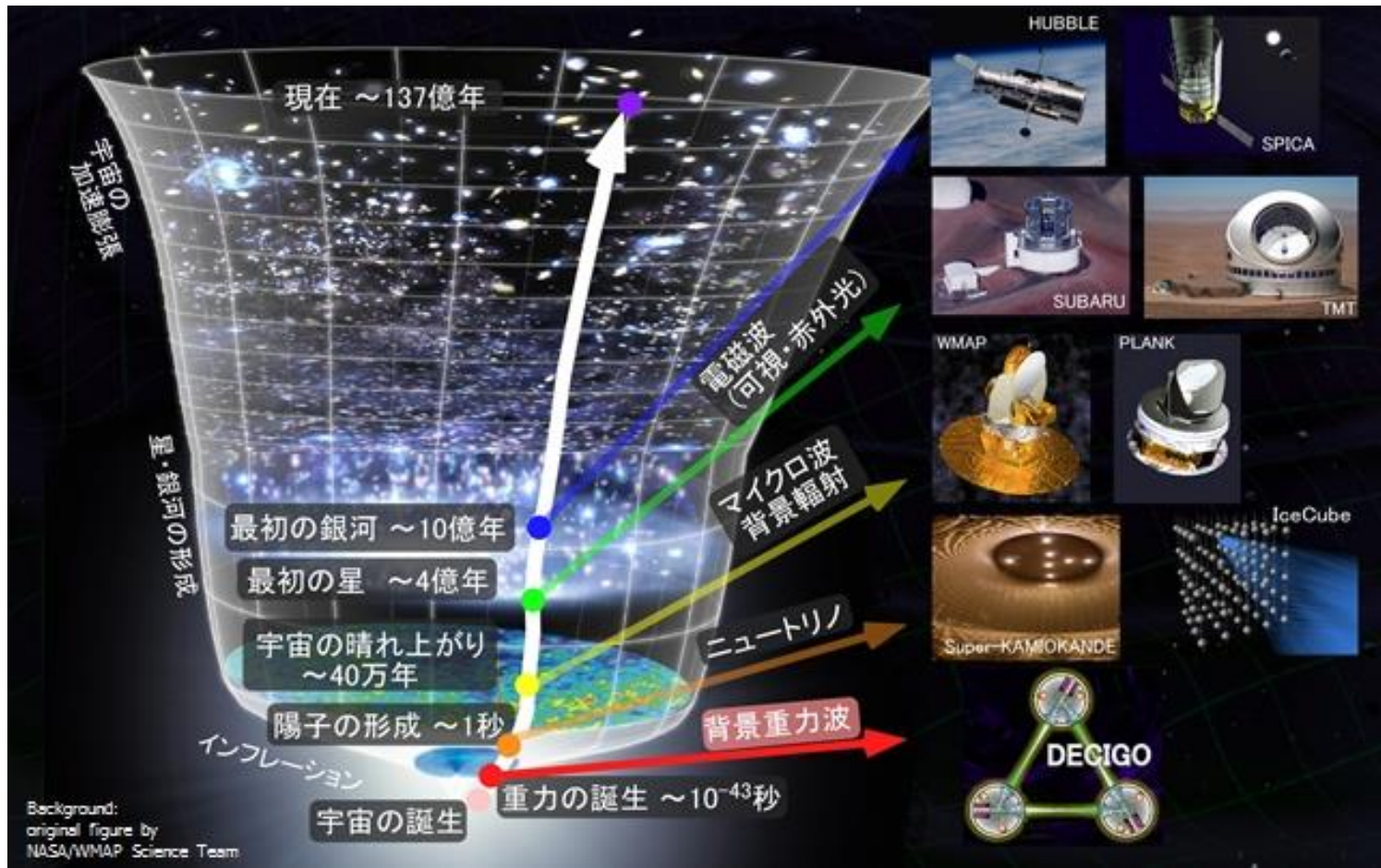


Lattimer & Parakash, Phys. Rep. 442, 109 (2007)



背景重力波

- たくさんの天体の集まり
- 宇宙論的起源の重力波(インフレーション、相転移)
宇宙誕生直後に迫る



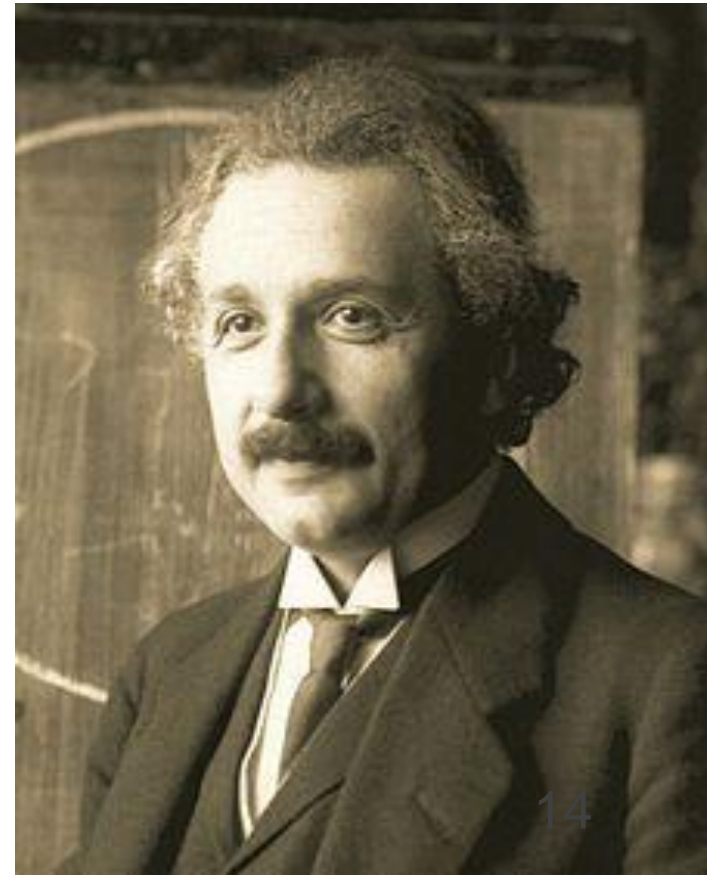
最初は受け入れられなかった重力波

- 1915年 Einsteinが一般相対性理論を発表
- 1916年 Einsteinが重力波の存在を予言
- 1936年 Einsteinが間違いだったとする論文投稿
→ 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**難しい**

Feynman

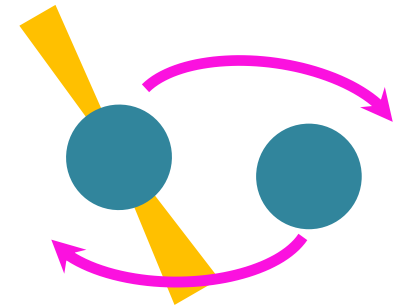


Wheeler



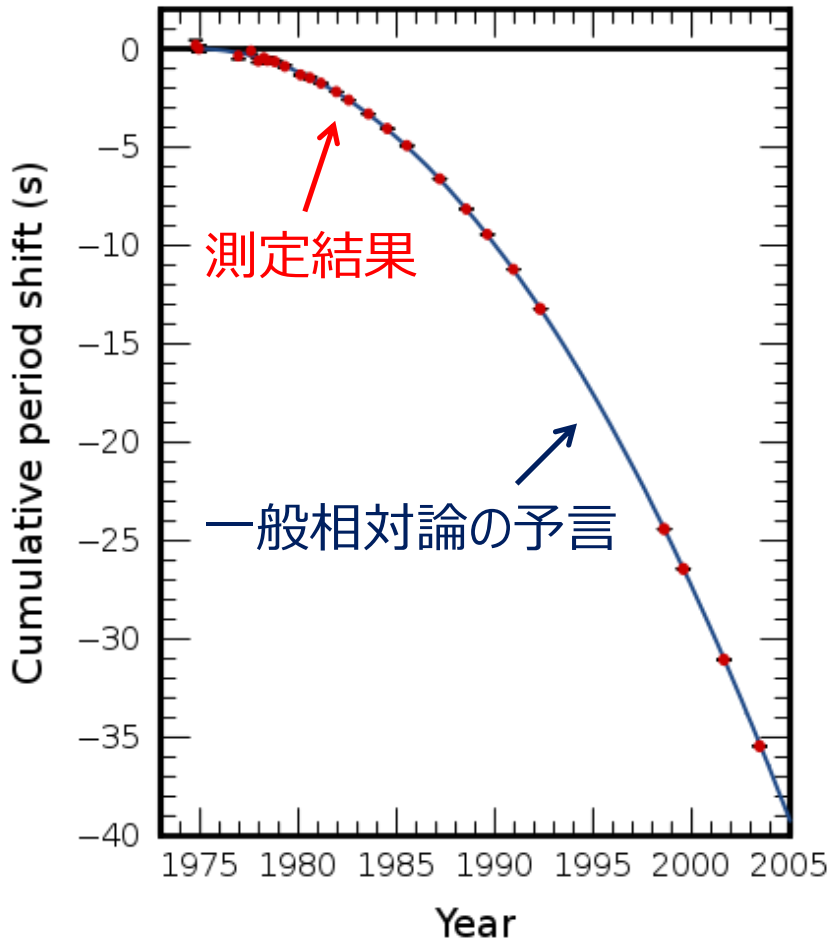
重力波の間接的証拠

- 1974年 Russel Hulseと Joseph Taylorが連星パルサーを発見

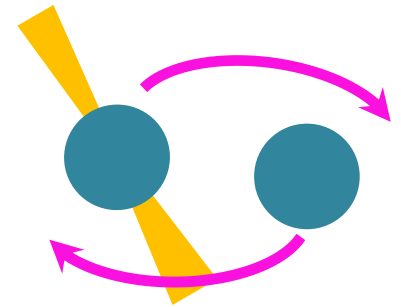


重力波の間接的証拠

- 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



アレシボ望遠鏡

重力波の直接検出の方法

- レーザー干渉計を使う
- 1960年代、Rai Weiss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

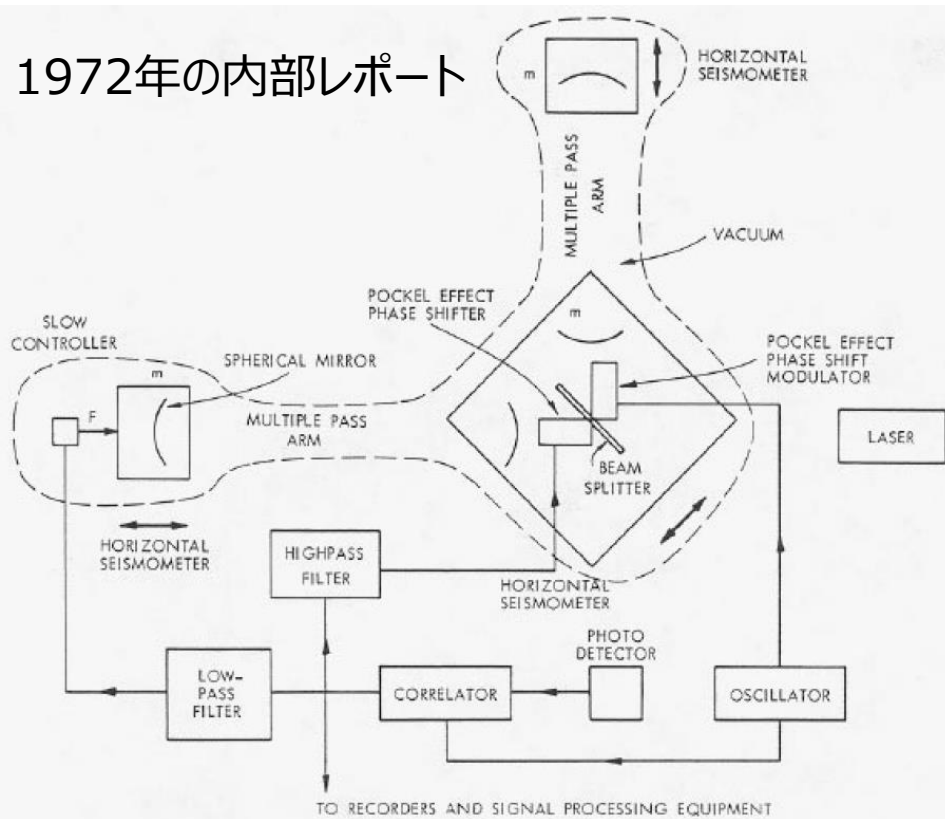
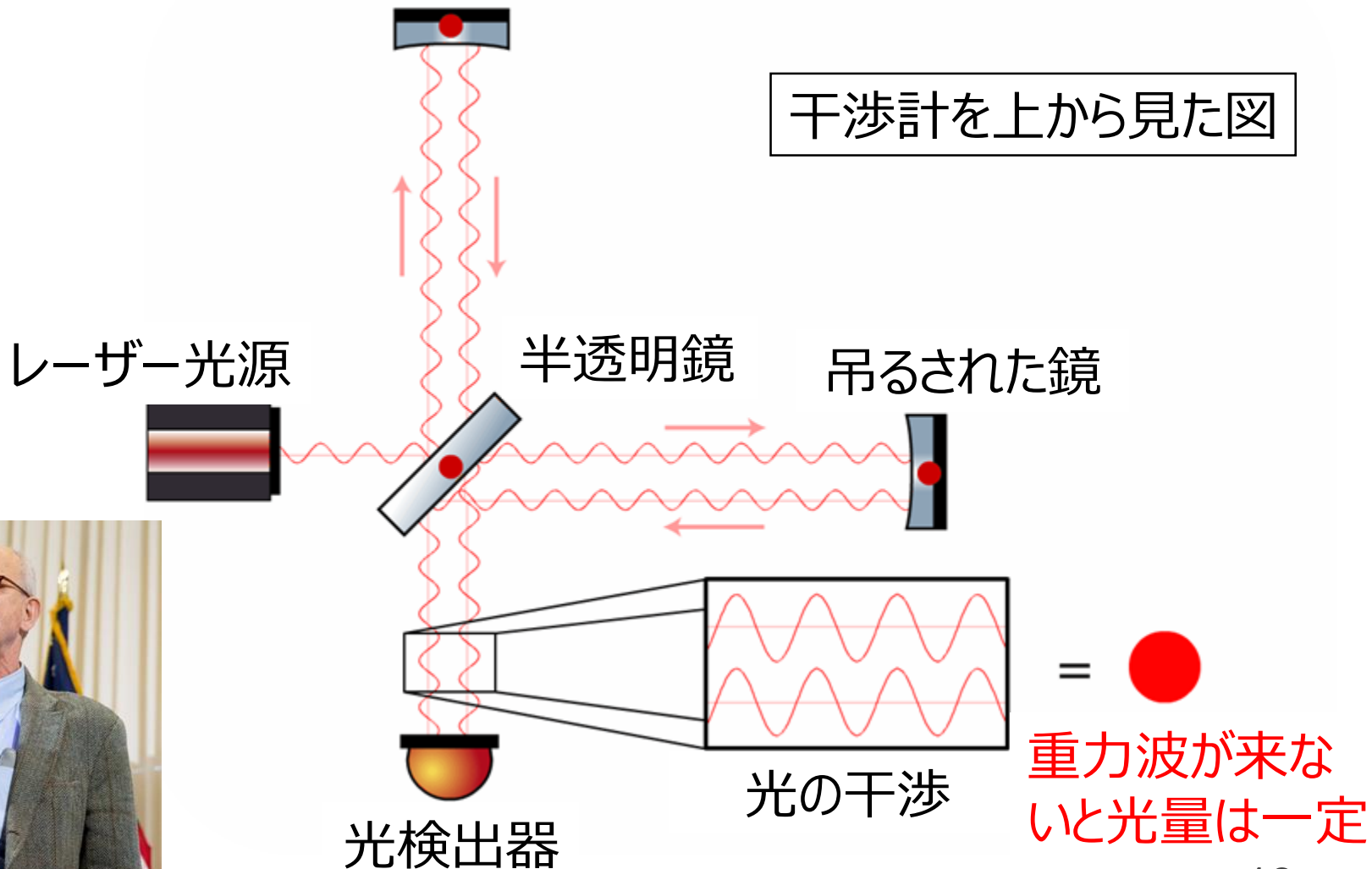


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



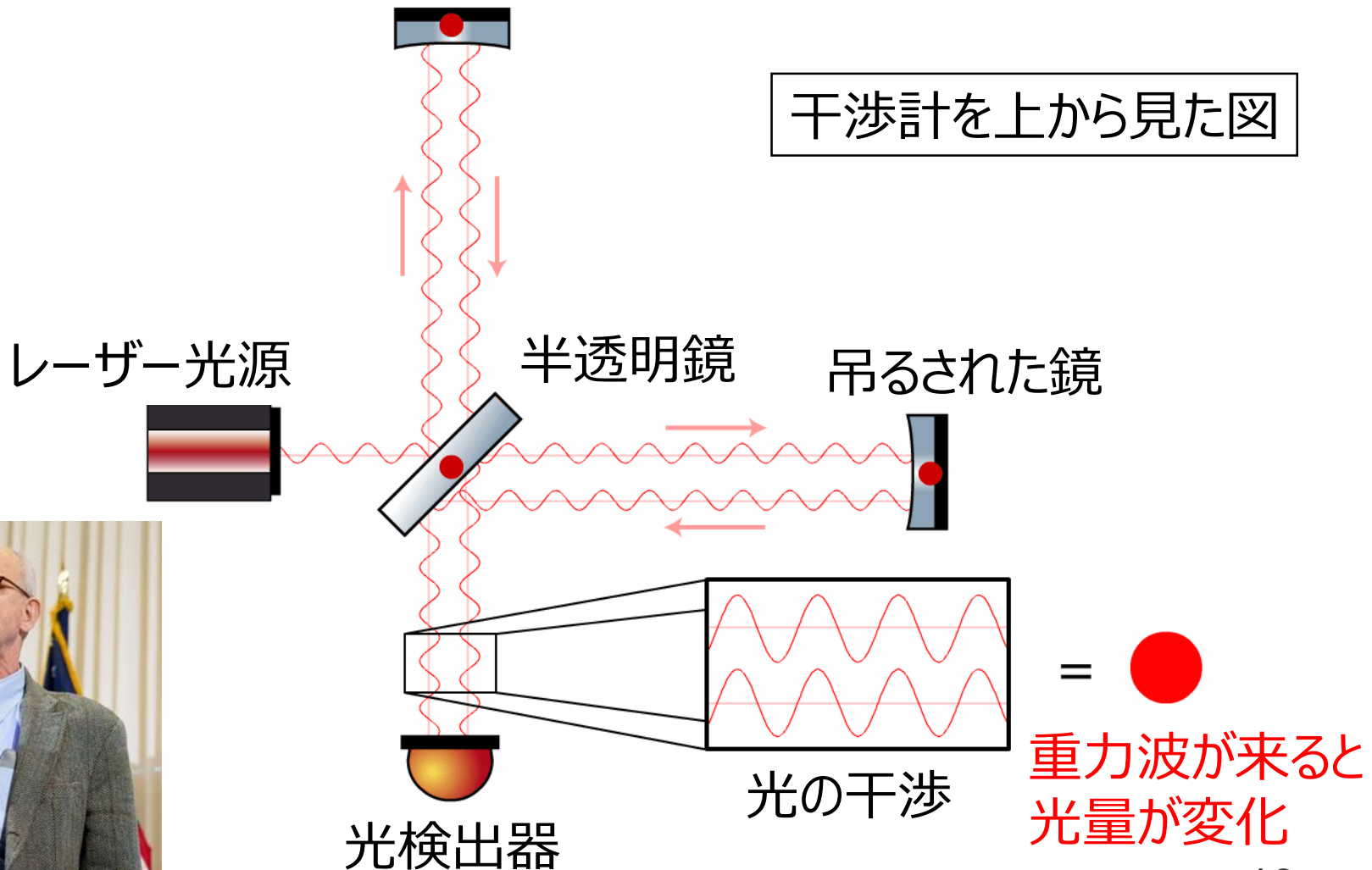
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



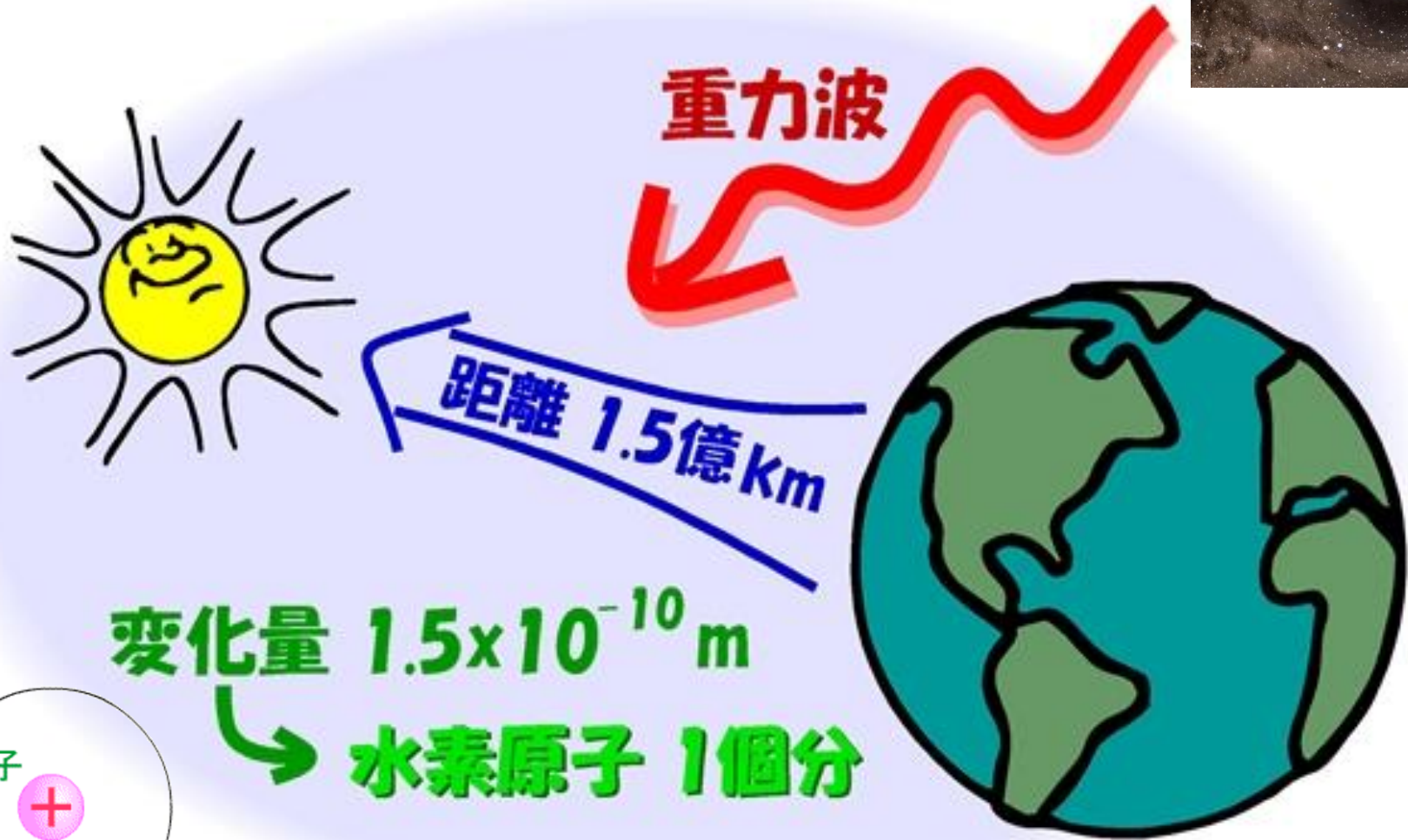
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 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)



重力波直接検出までの歴史

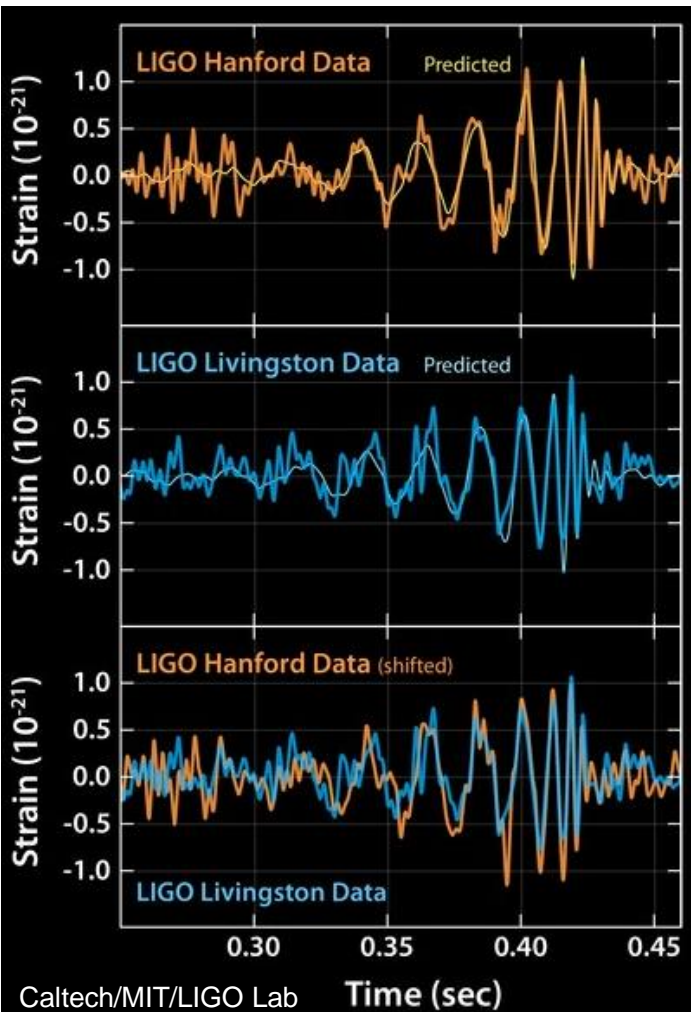
- 1916年 Einsteinが重力波を**予言**
- 1960年代 Weissが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始
LIGO (アメリカ 4km)、TAMA300 (日本 300m)、
GEO600 (ドイツ 600m)、Virgo (イタリア 3km)
→ 重力波は**見つからず**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 Advanced LIGOが
初稼働
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表
**予言から100年、
提案から50年！**

初検出を発表するDavid Reitze



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

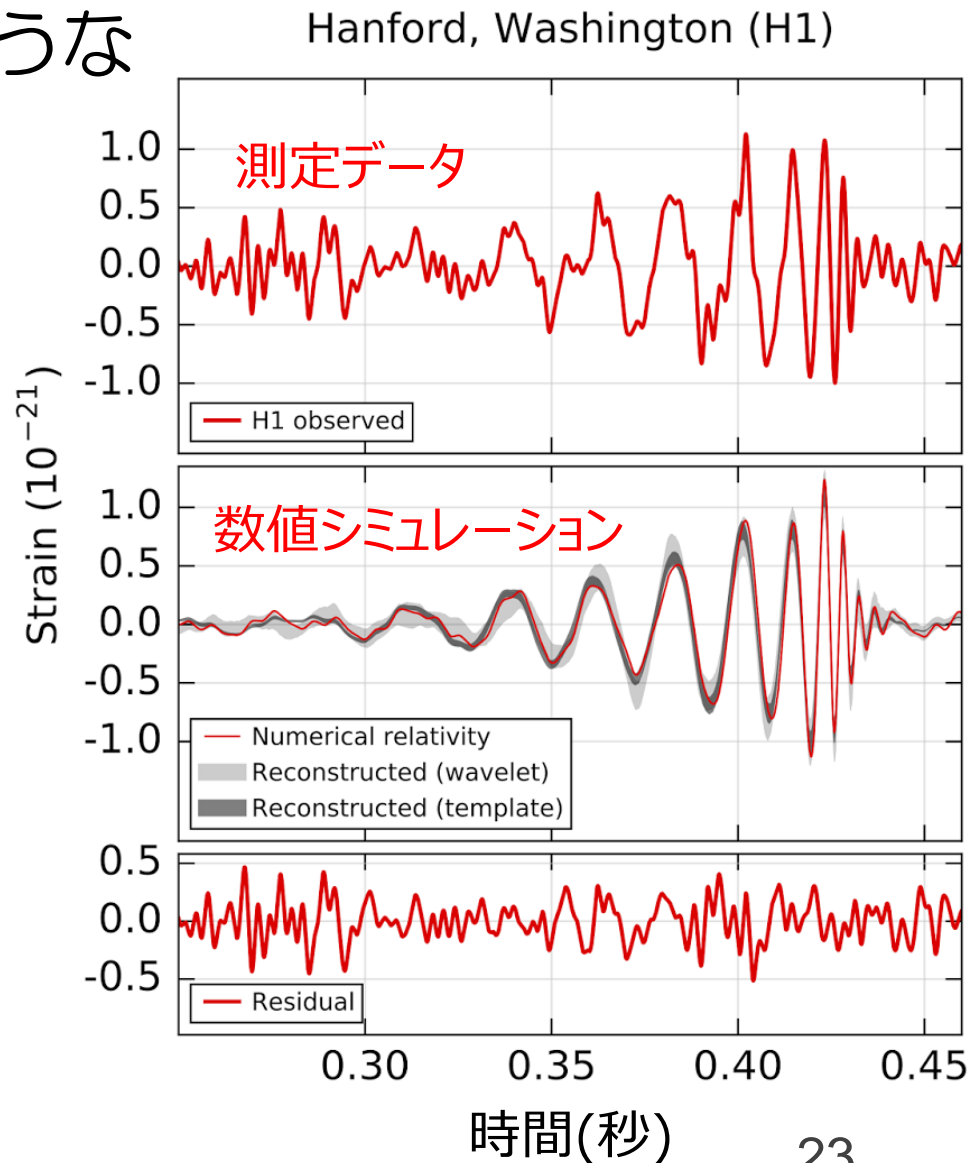


ハンフォード
観測所



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、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションの大勝利



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

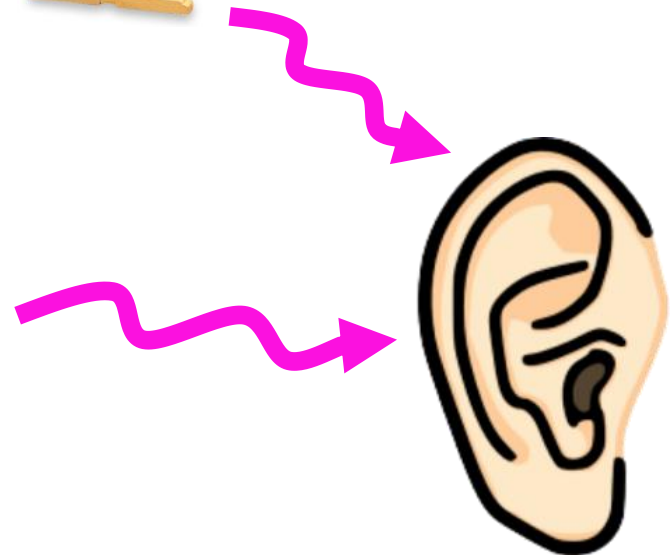
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

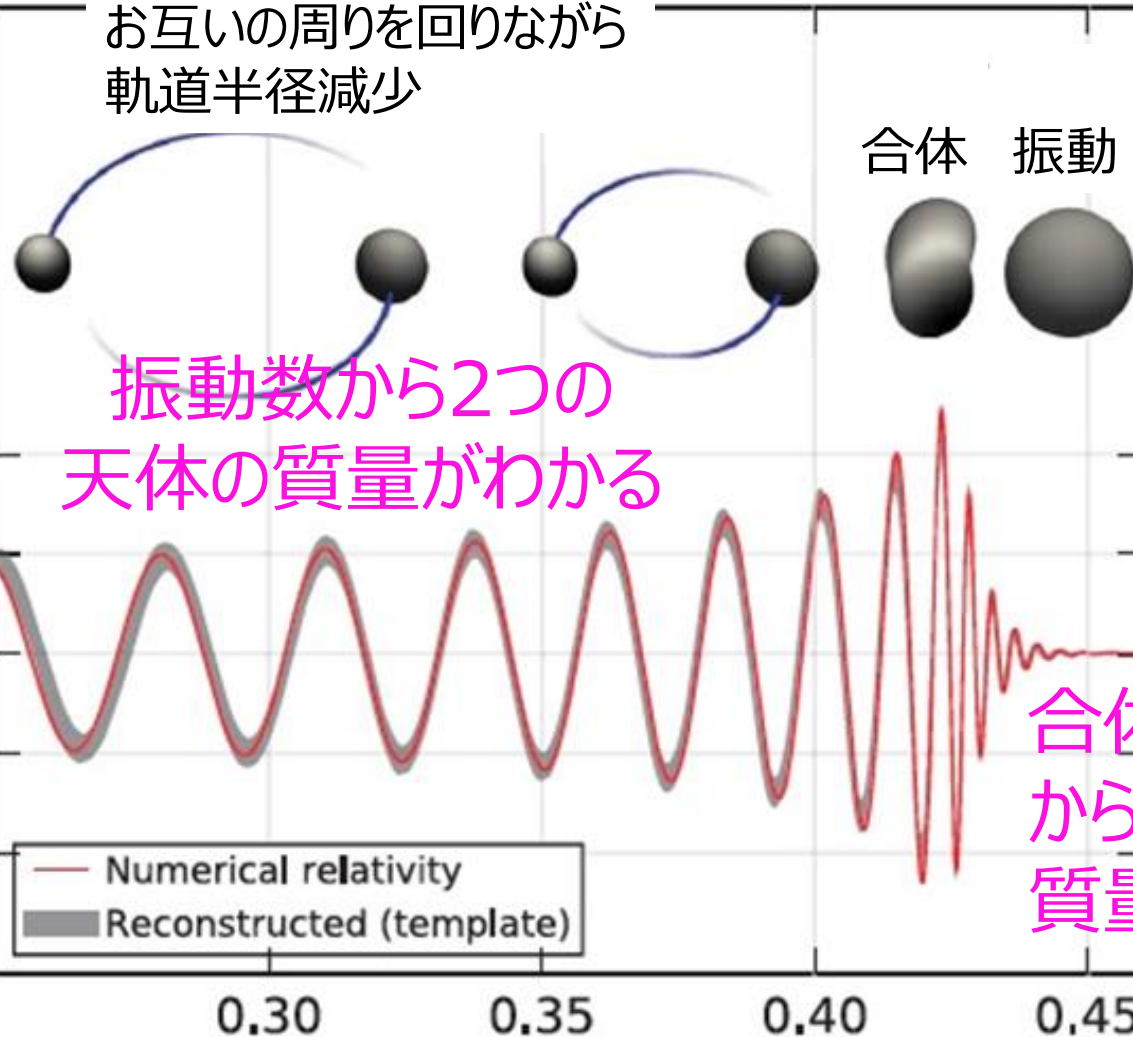


重力波形から何がわかるか？

- 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

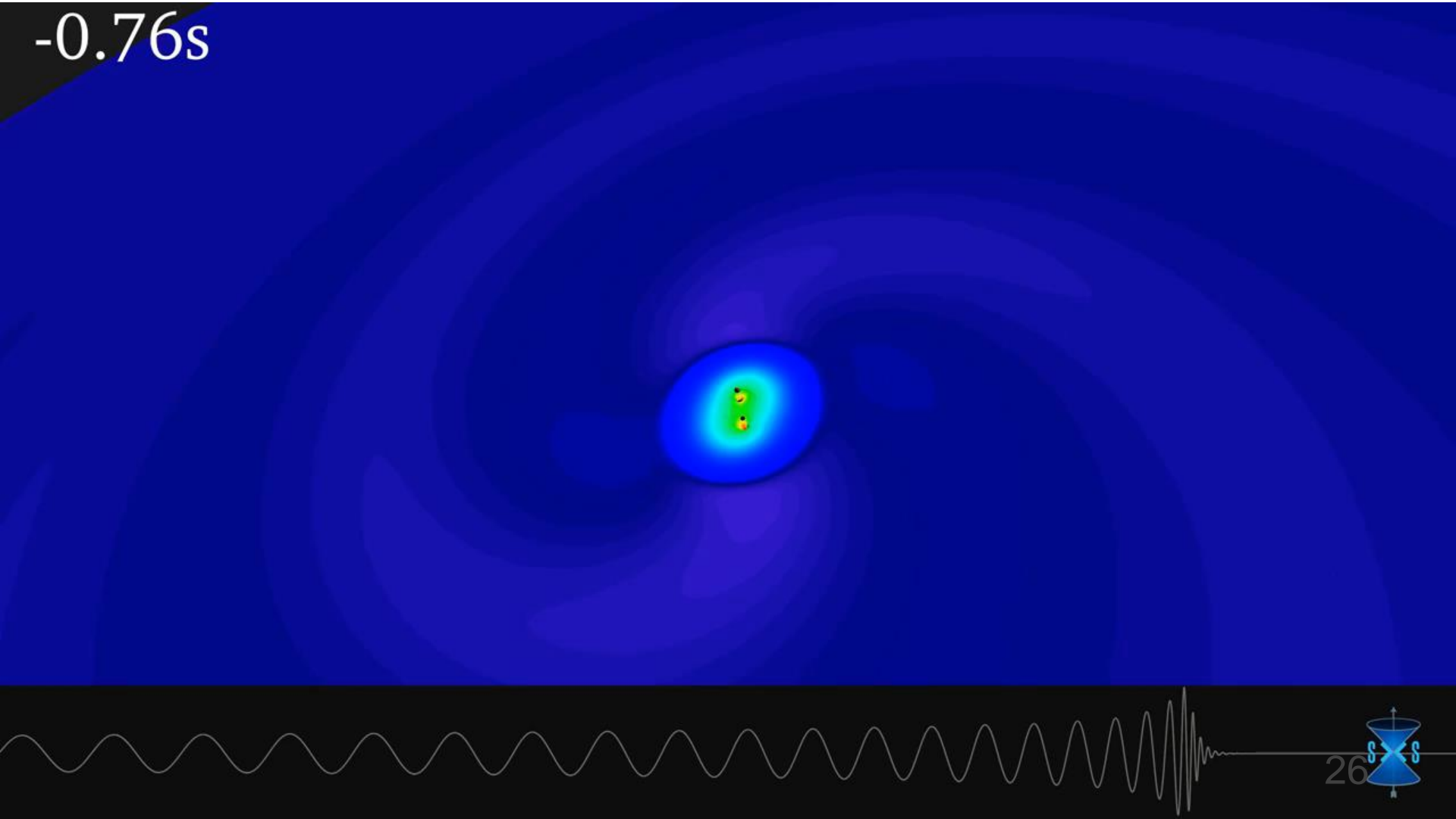
合体 振動



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

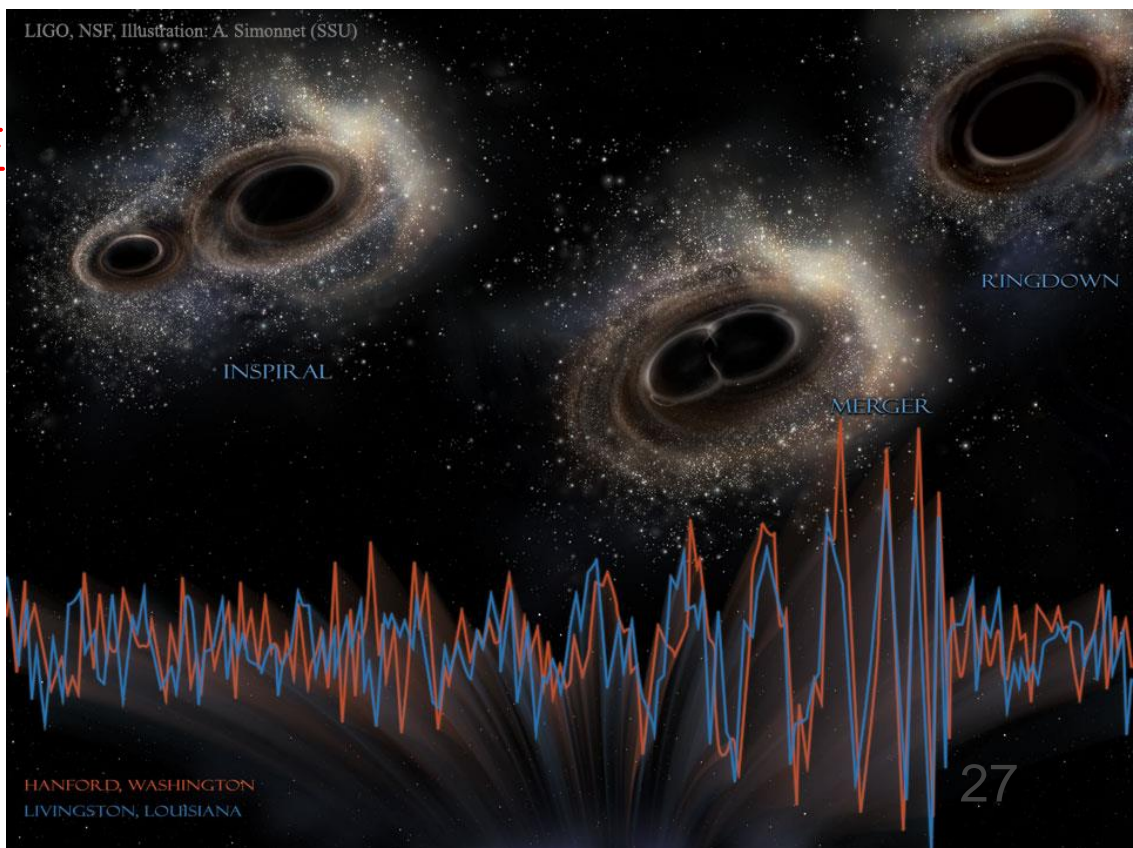
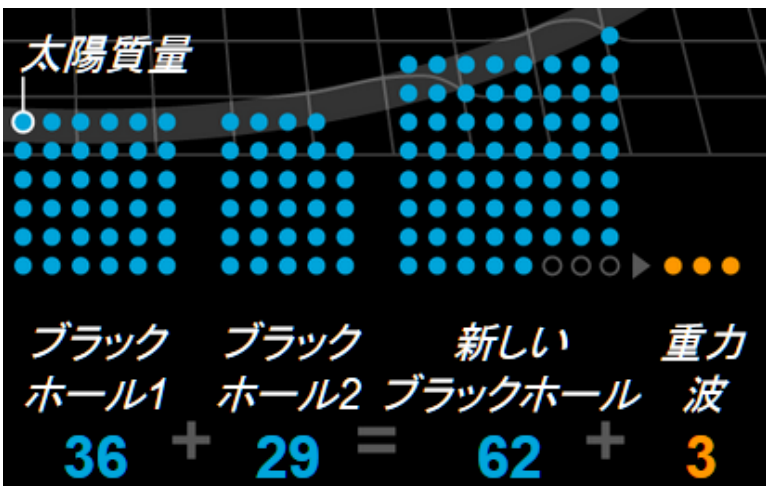


重力波形からわかったこと

- 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

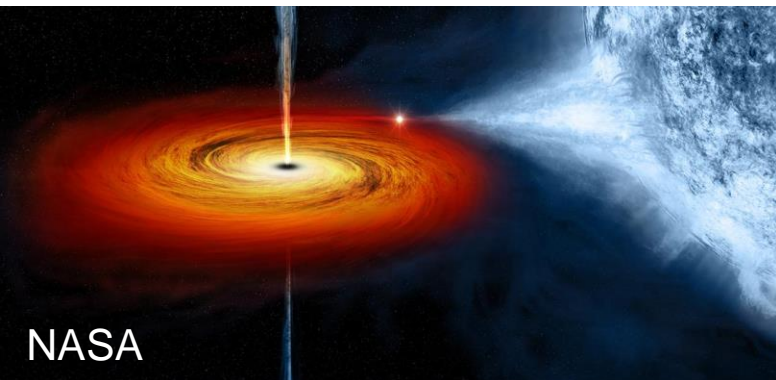
$$E = mc^2$$



ブラックホール質量の謎

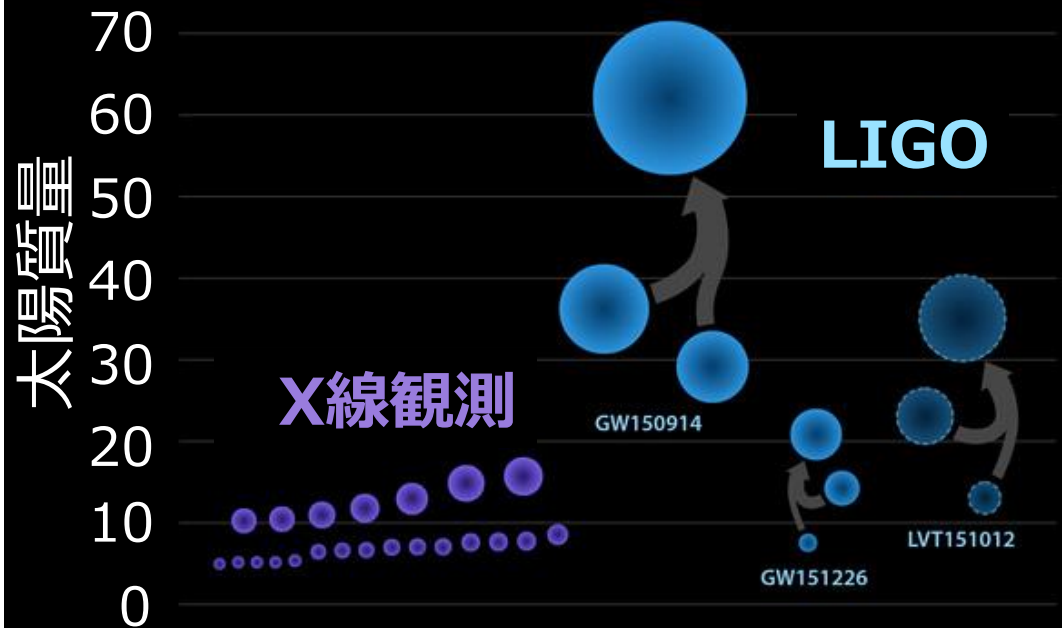
- これまでX線の観測で見つかっていたブラックホールはせいぜい10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか？

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



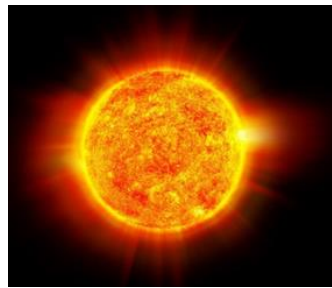
<https://www.ligo.caltech.edu/>

質量がわかっているブラックホール



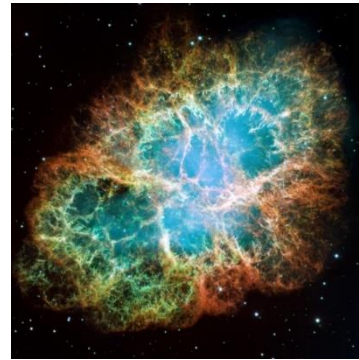
ブラックホールはどうできる？

- 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

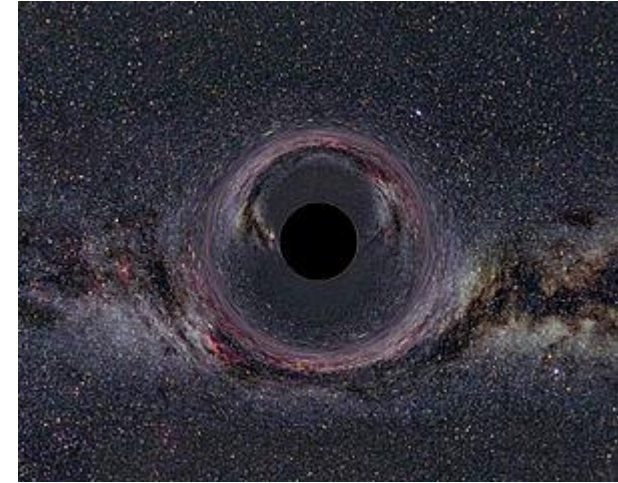


普通の星

歳を取ると
→



重い
場合



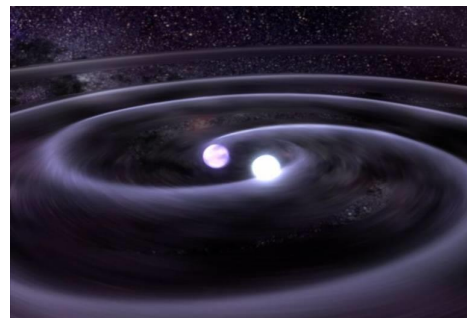
軽い場合
←

超新星爆発



中性子星

→



連星合体

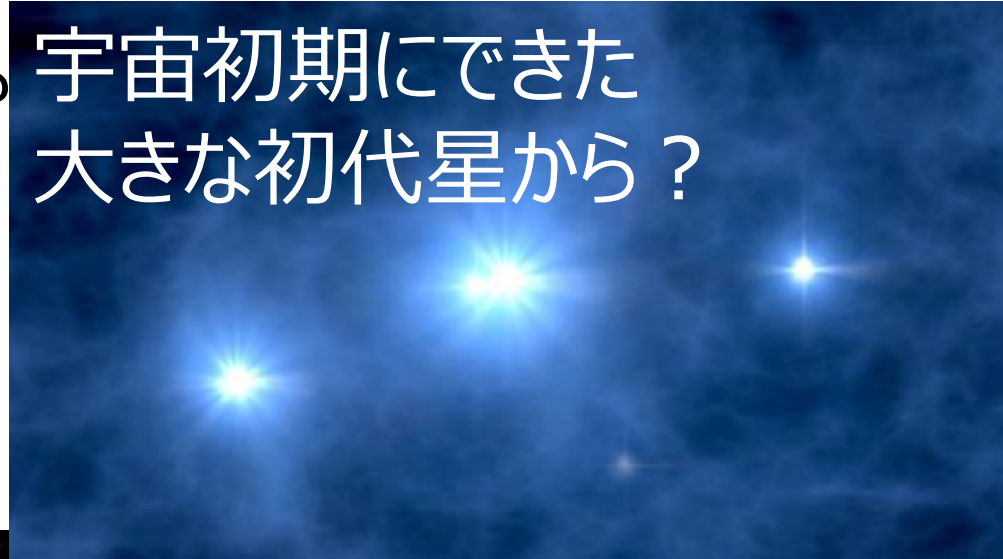
→

10太陽質量
程度以下の
ブラックホール

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？

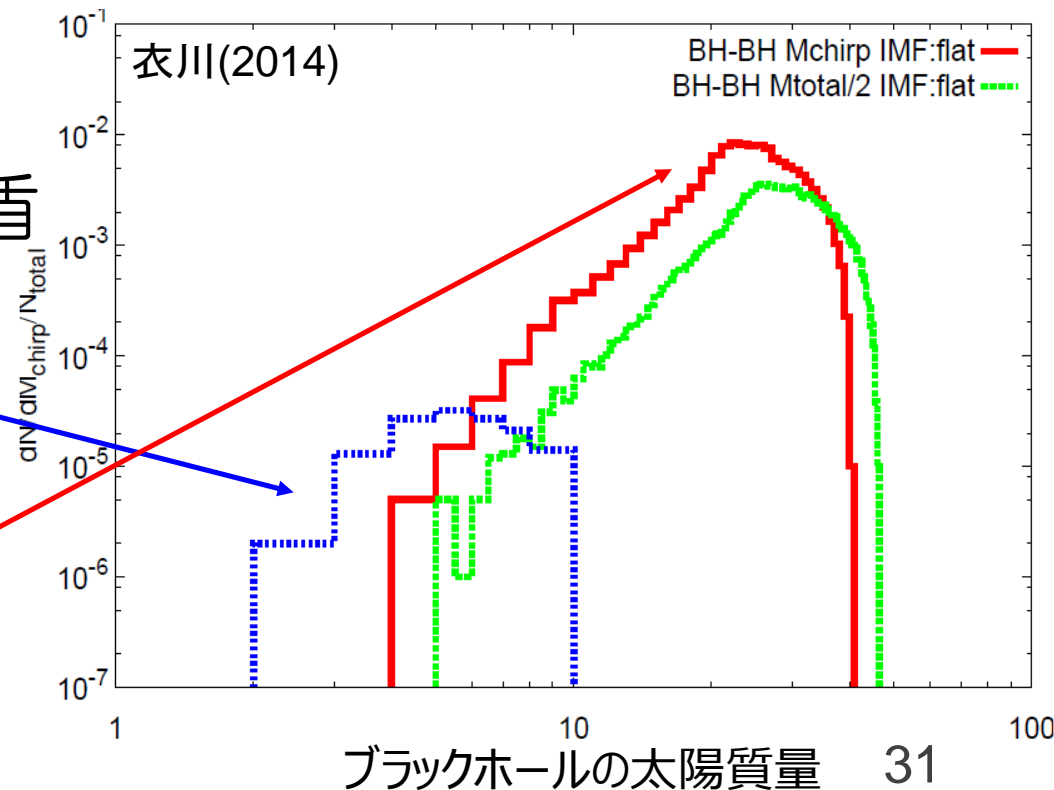


衣川ら(2014)の理論モデル

- 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



ブラックホールの準固有振動

- 合体後のブラックホールの質量とスピンのわかる

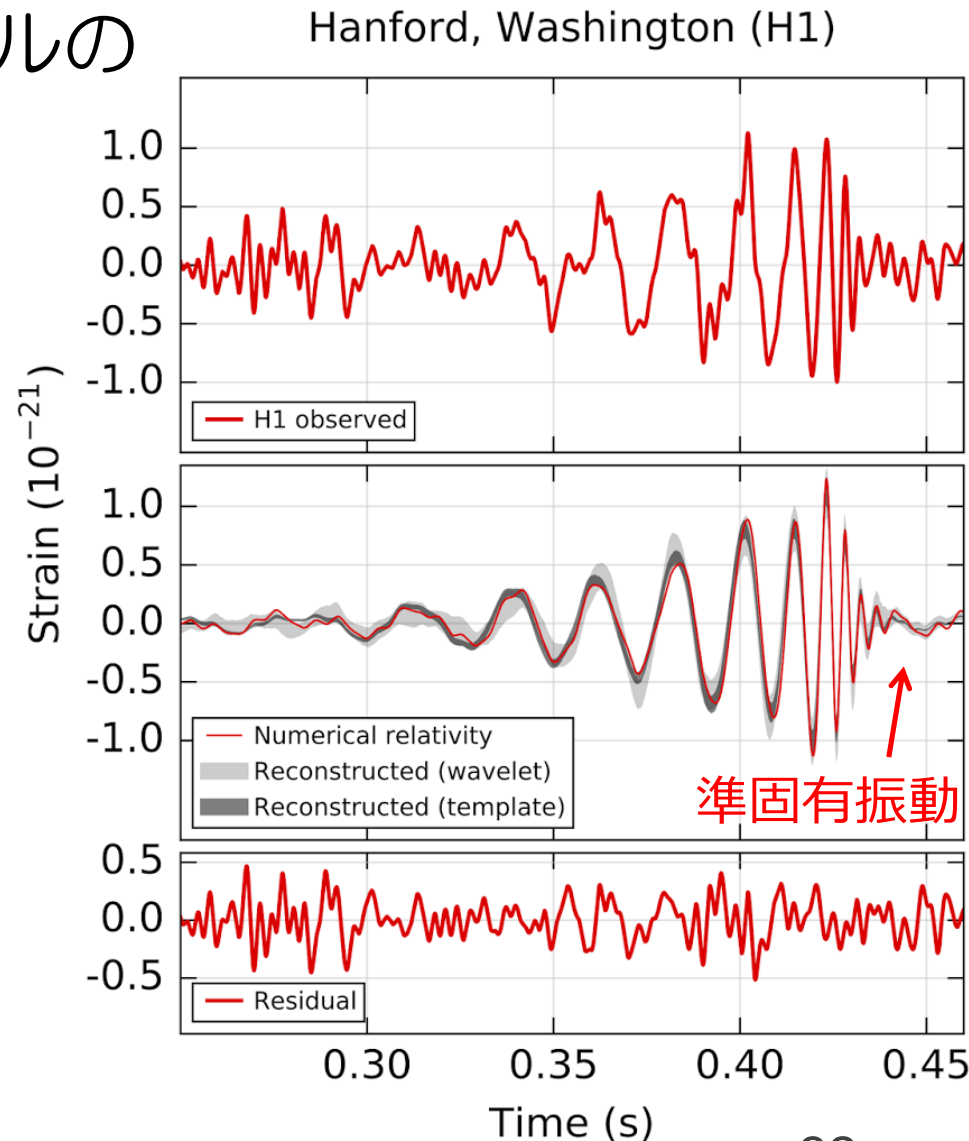
primary $0.32^{+0.49}_{-0.29}$

secondary $0.44^{+0.50}_{-0.40}$

remnant $0.67^{+0.05}_{-0.07}$

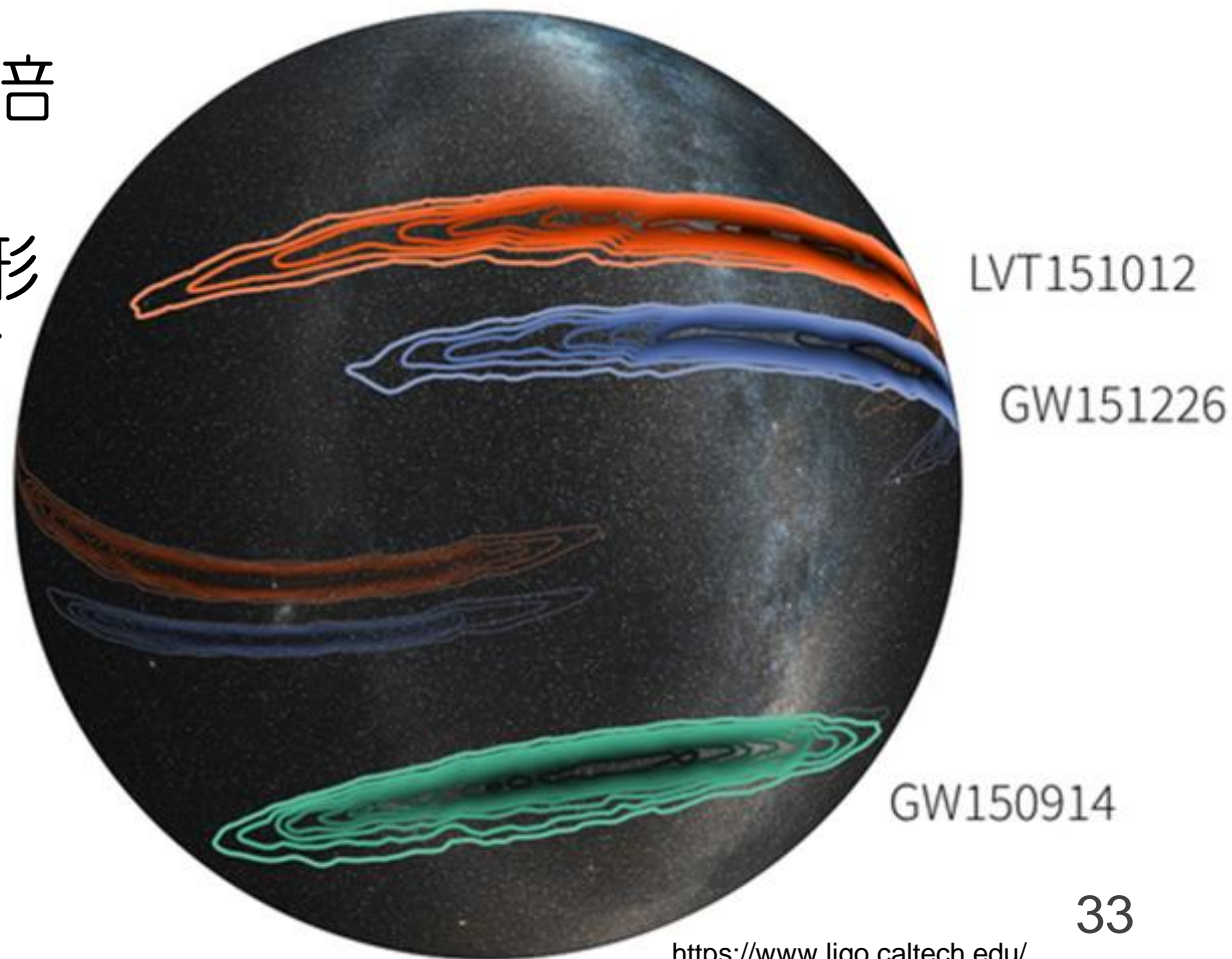
- スピンから連星の起源を示唆できる

- よりたくさん、よりSNRの高い検出が必要



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

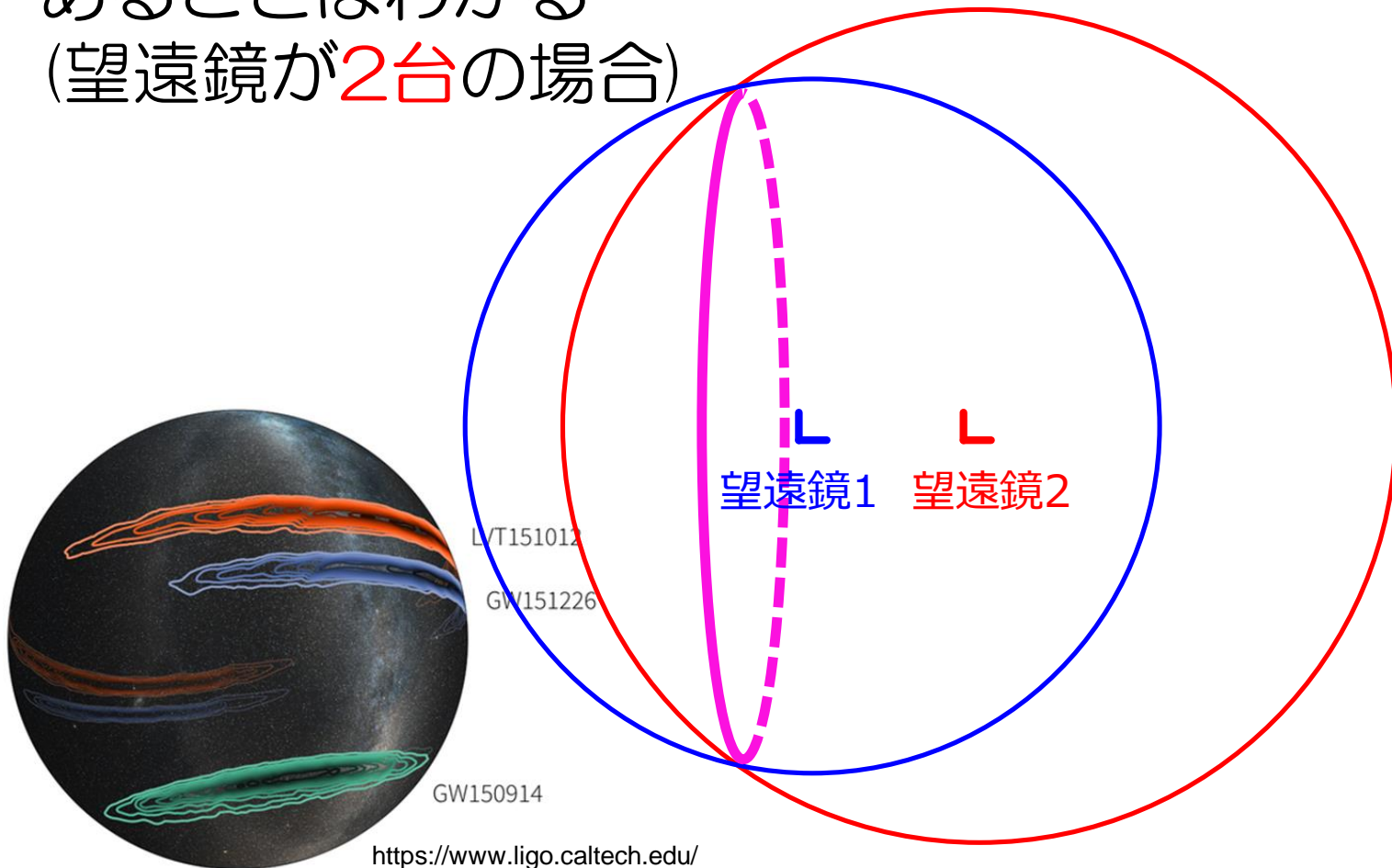


到達時刻にわずかな差が生じる

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)

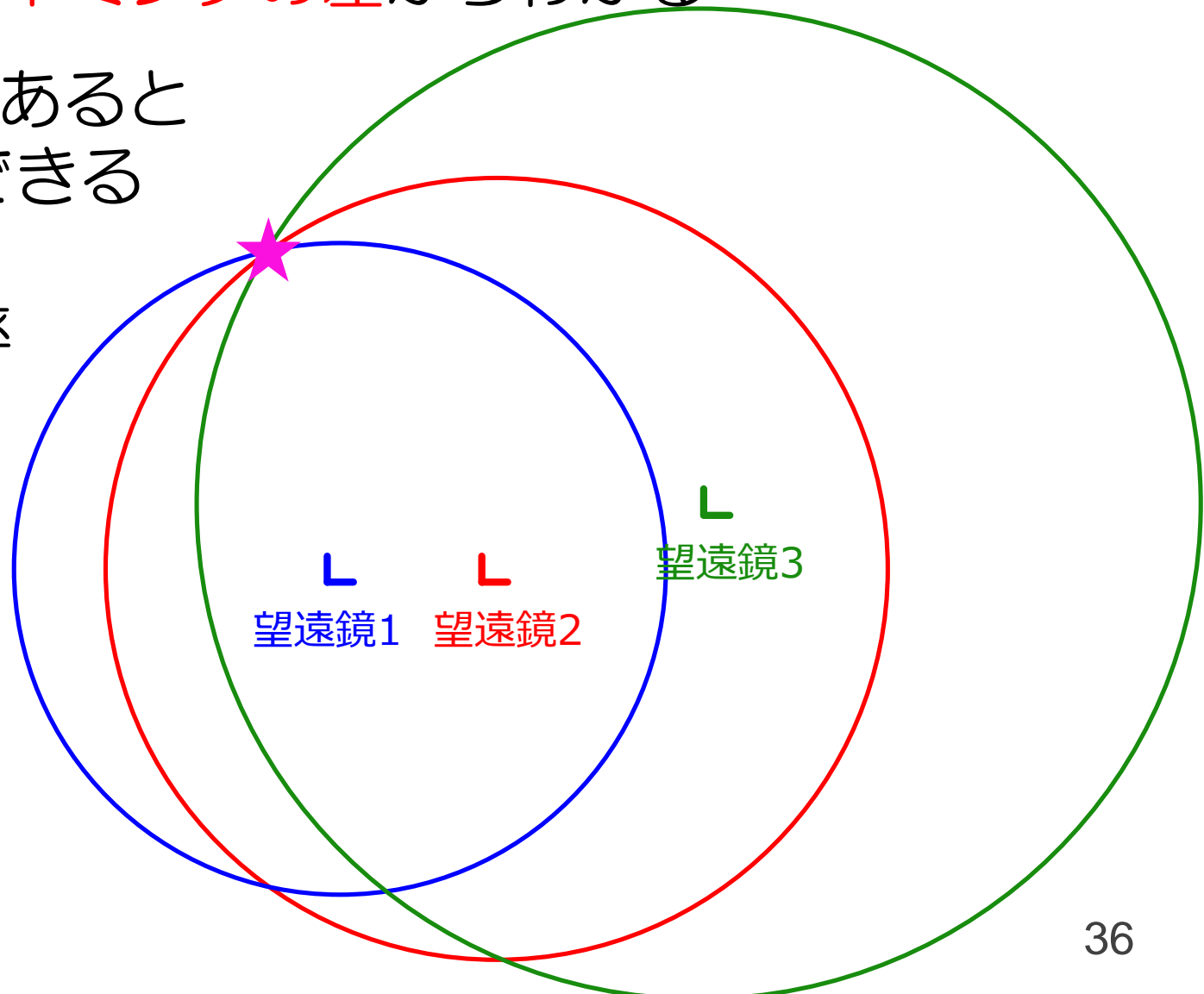


波源の特定方法

- 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 Virgo
(建設中)



Advanced LIGO
(O2へ準備中)



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



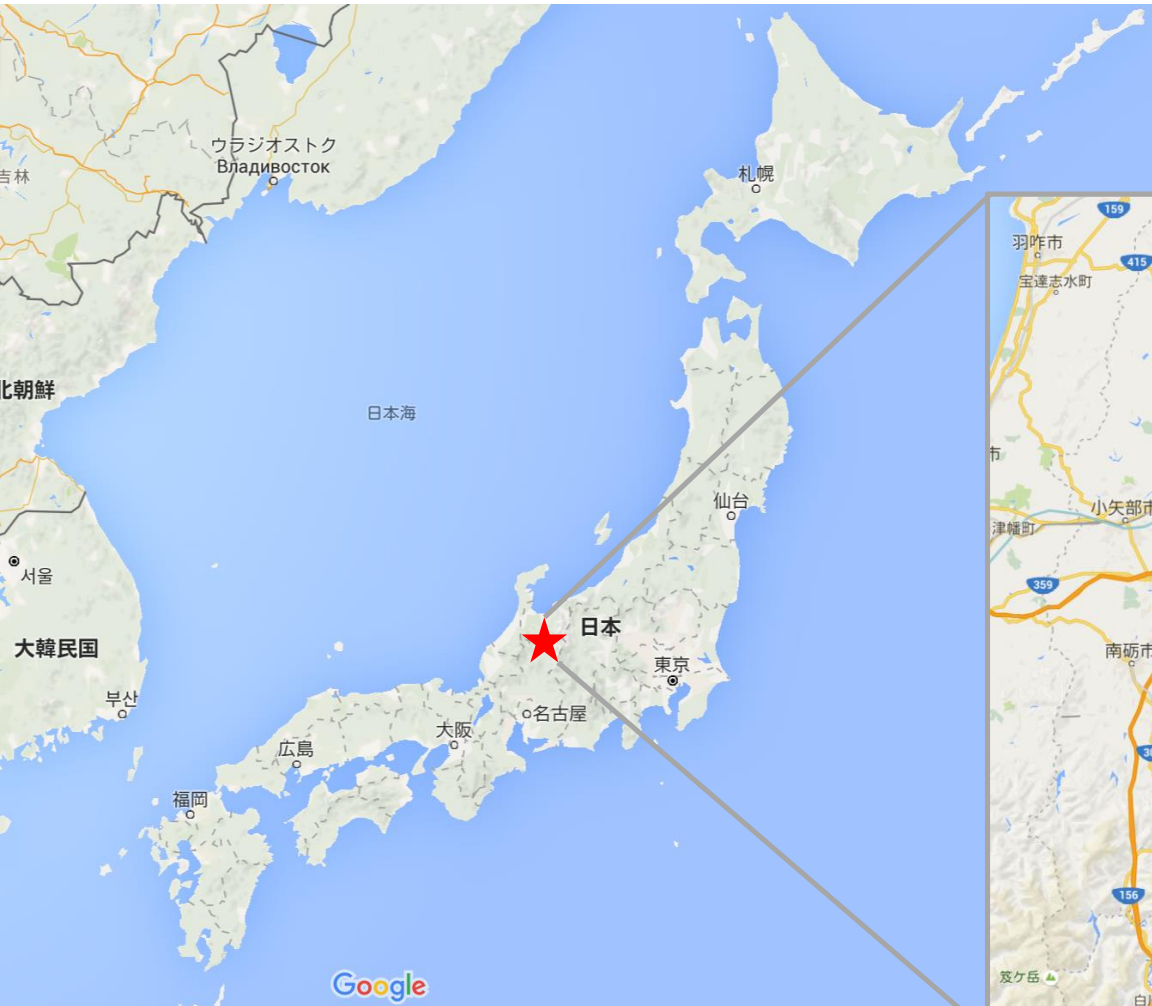
などなど

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

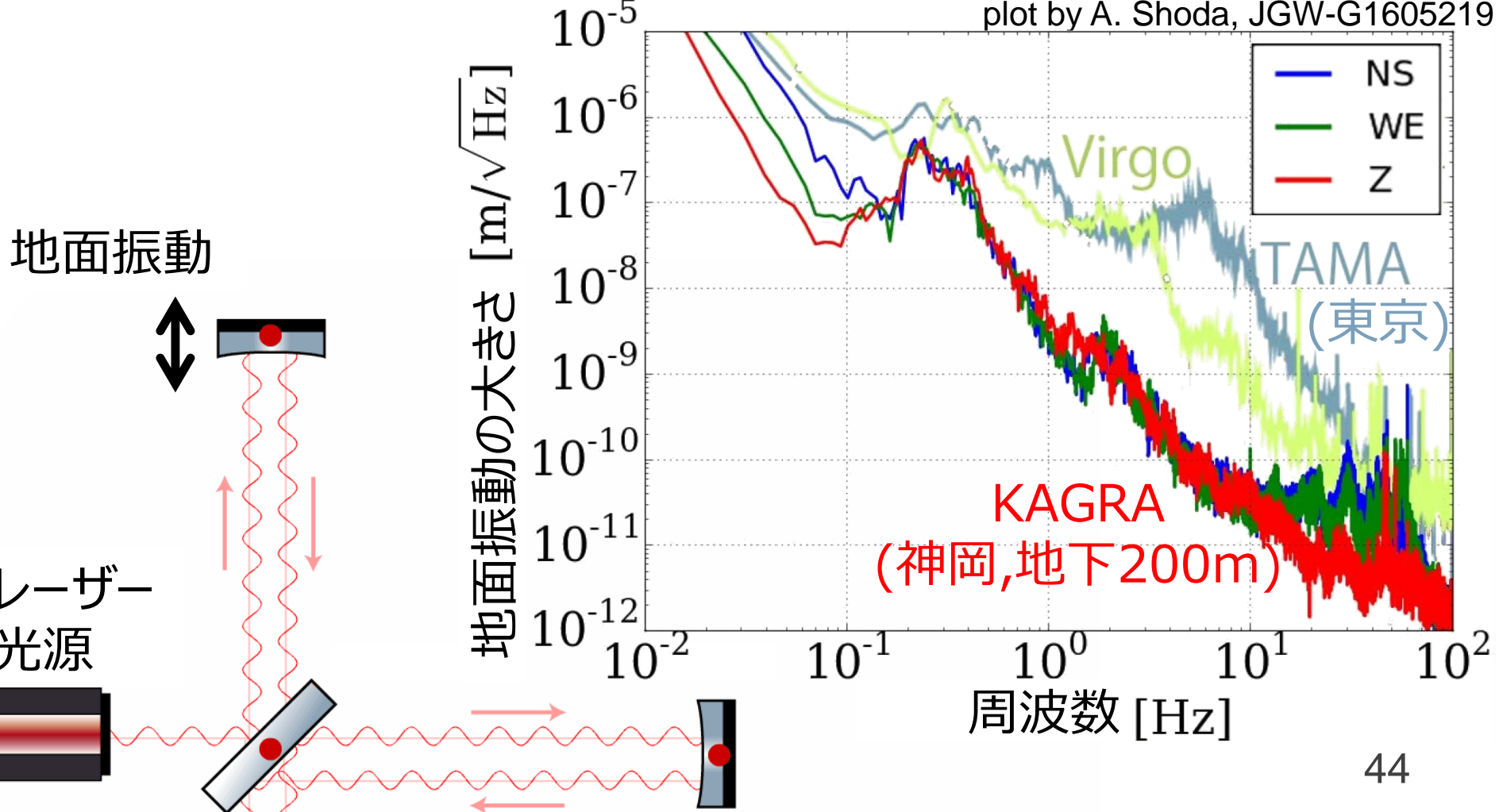
- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



なぜ地下なののか？

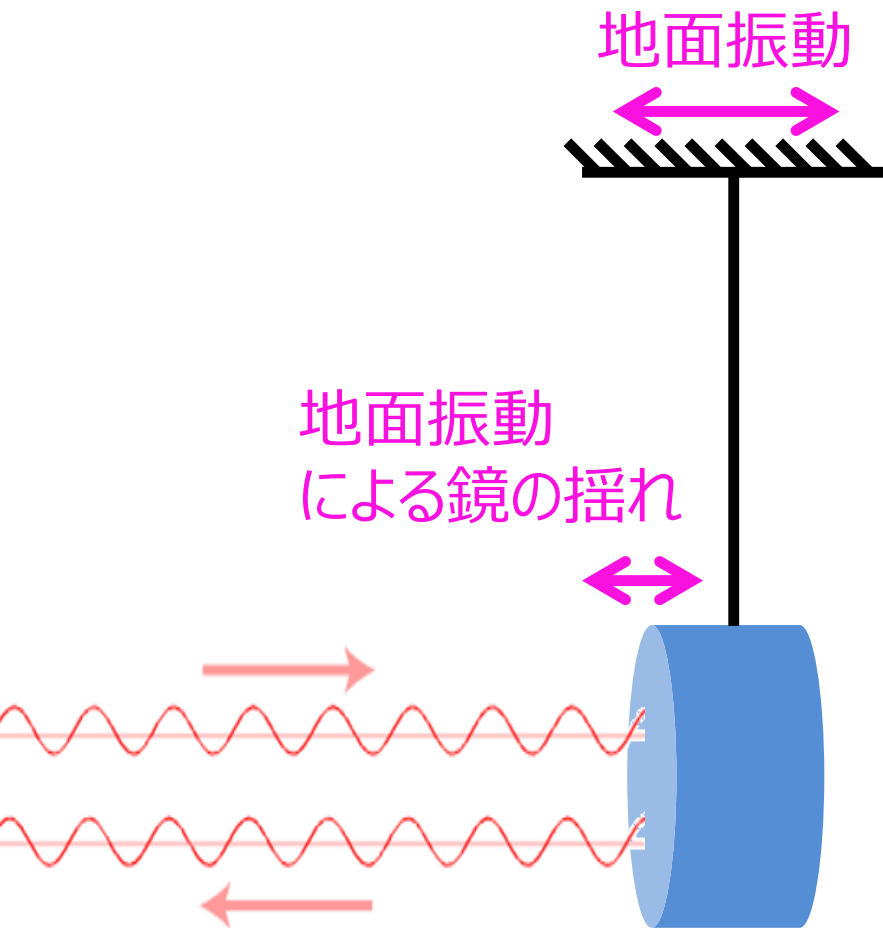
- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



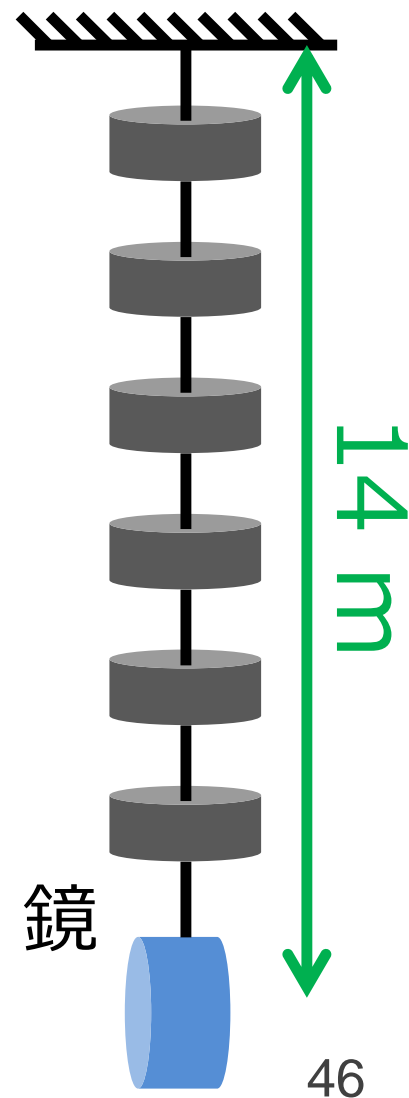
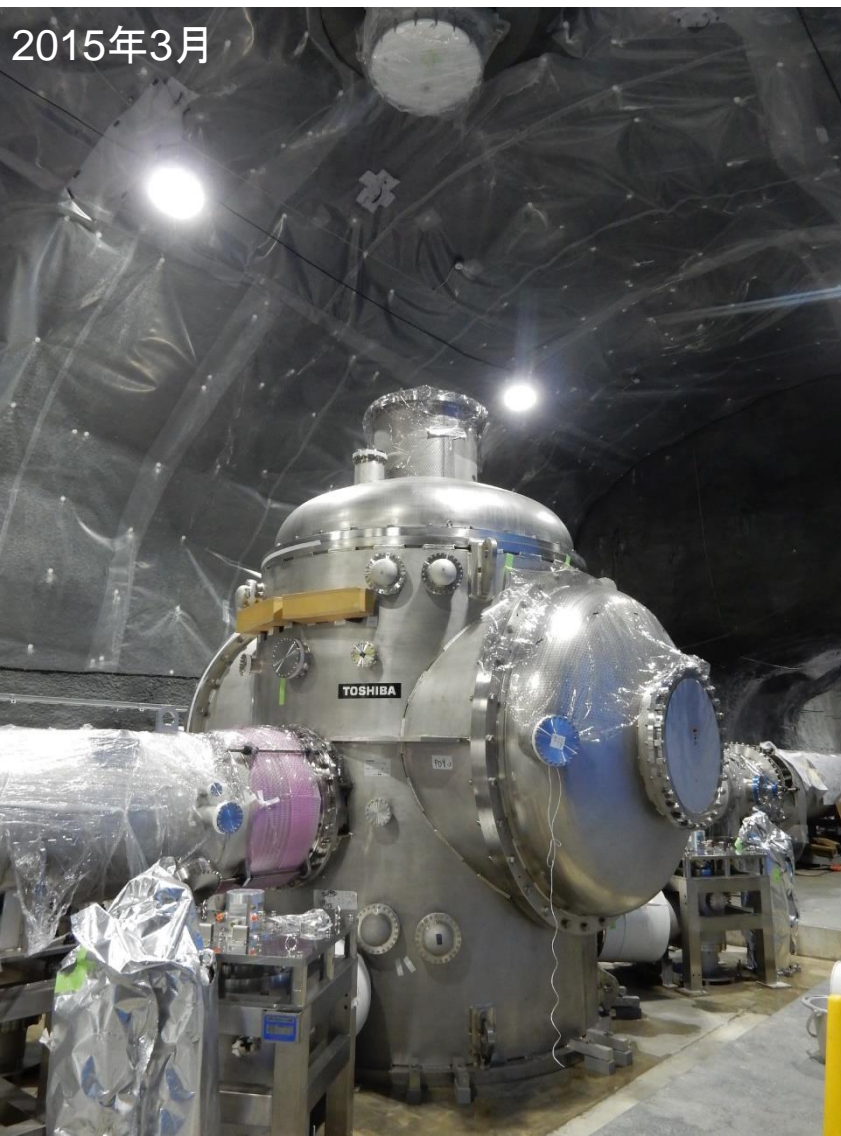
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)

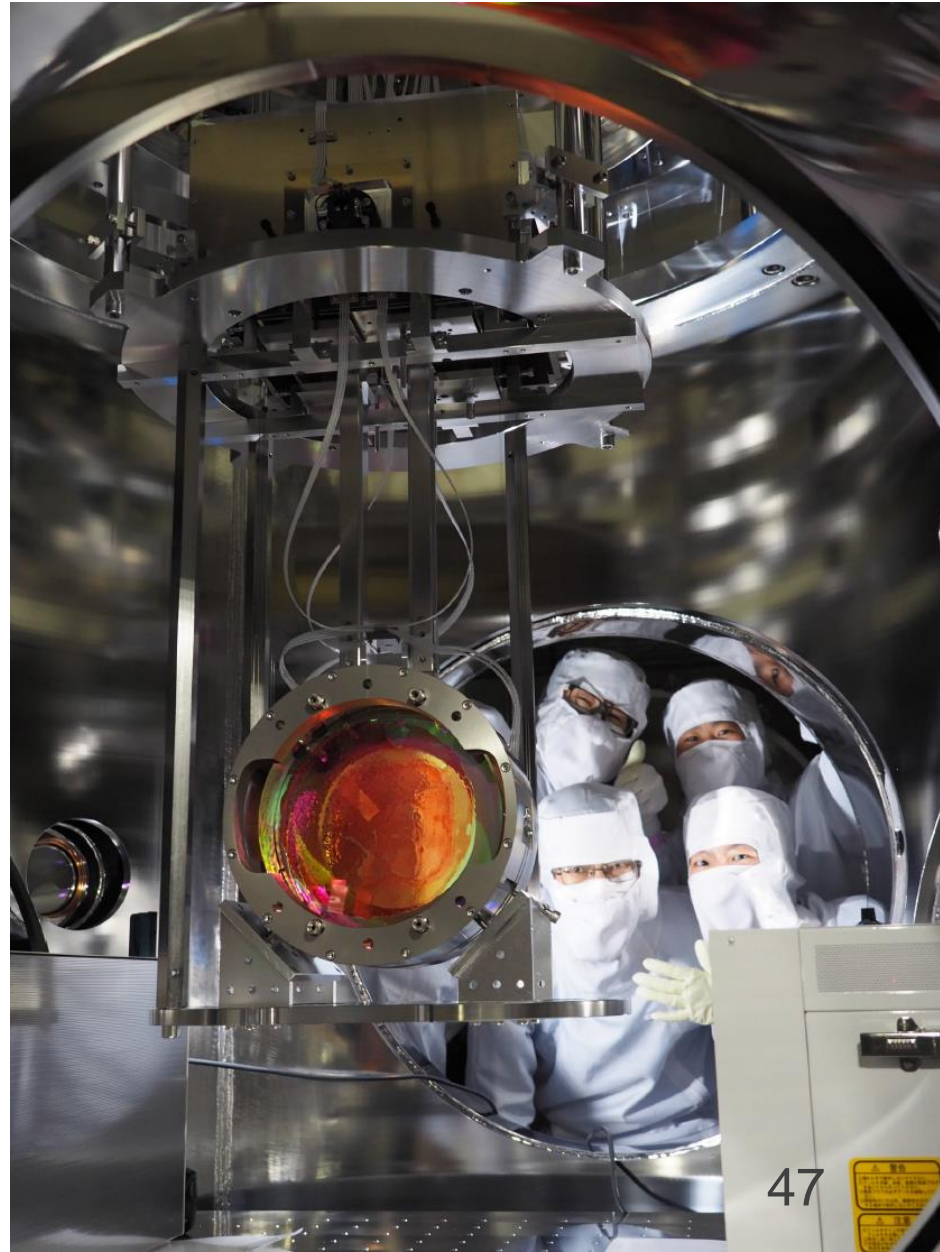
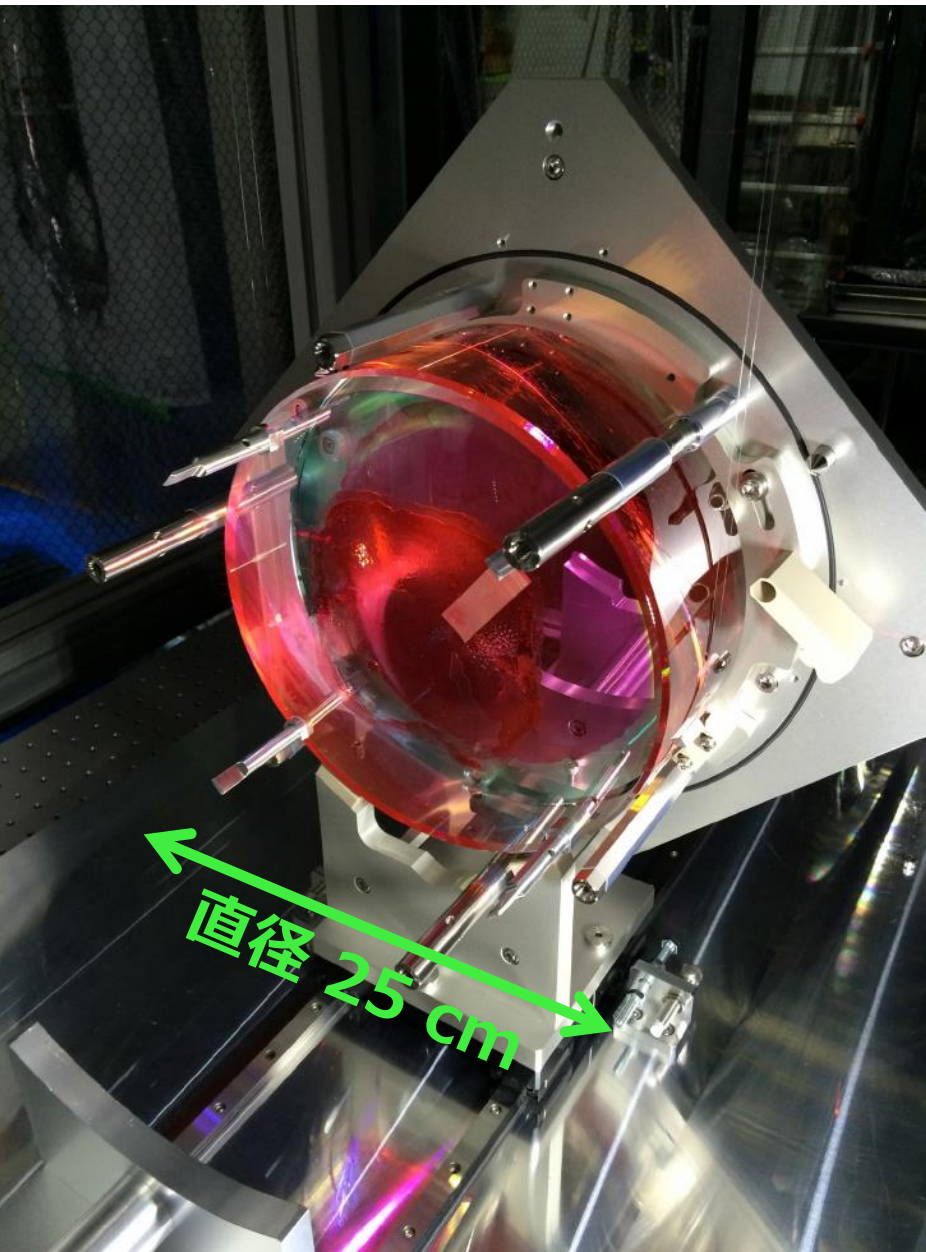


KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

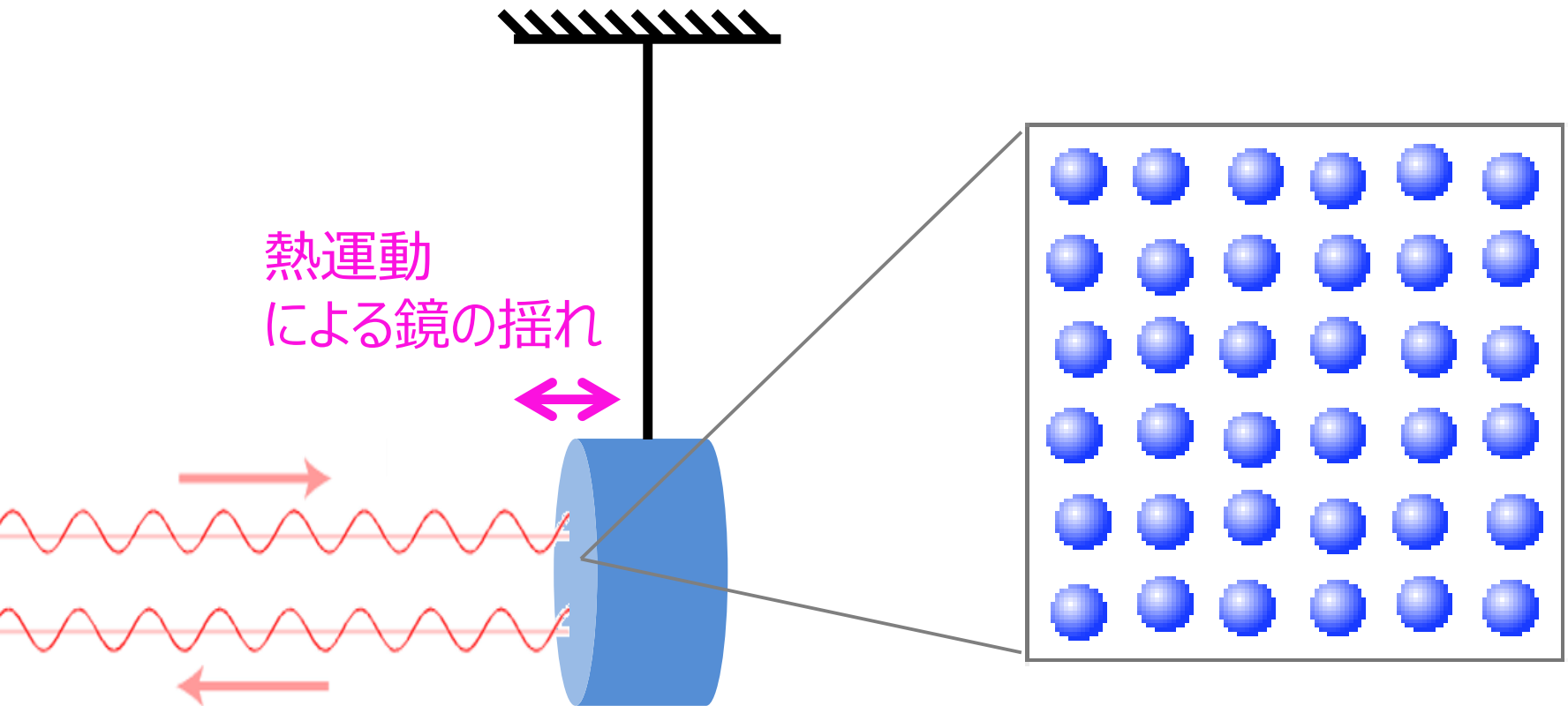


KAGRAの鏡の防振装置



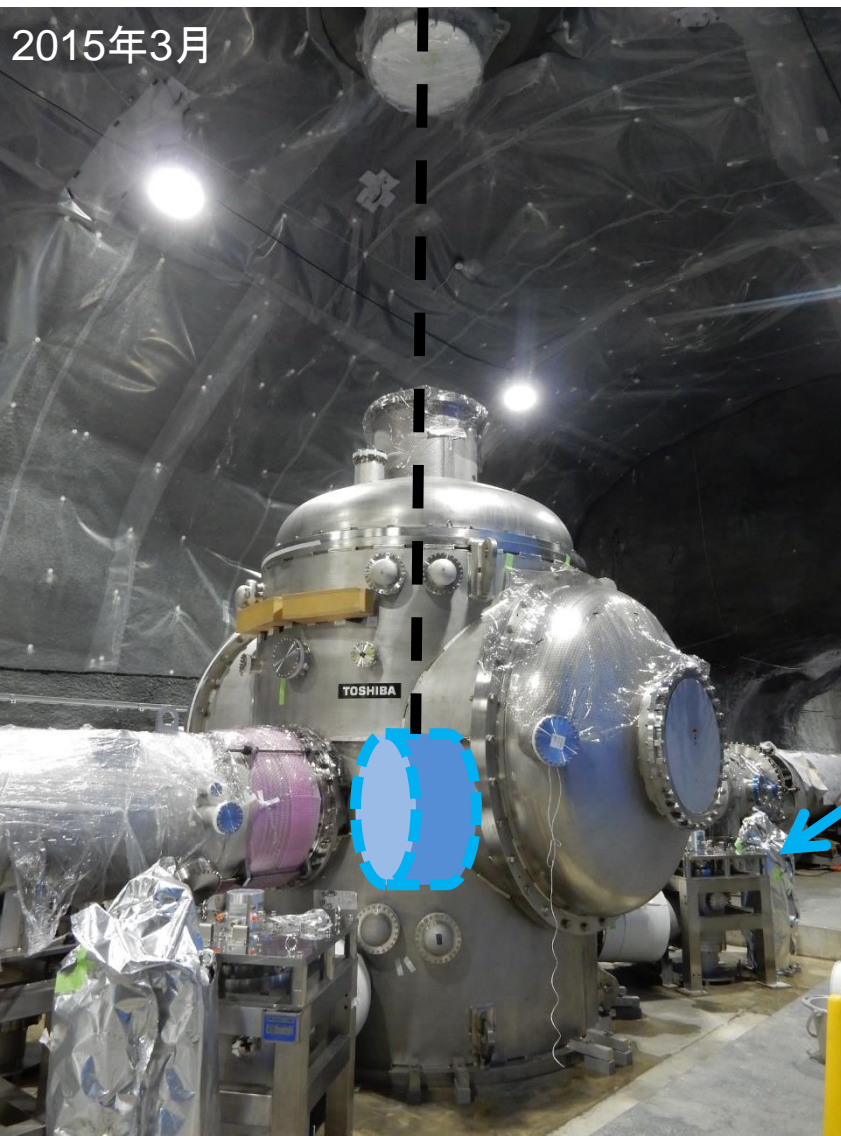
鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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
- 20 Kまで冷やすことで熱運動を小さくする

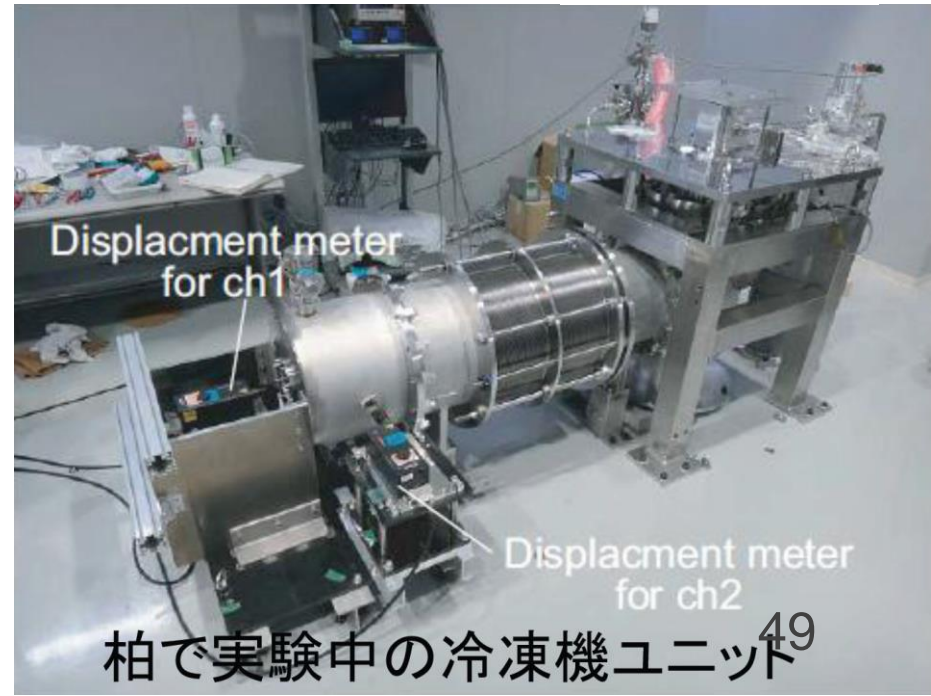


KAGRAの低温装置

- 最低振動の冷凍機を開発

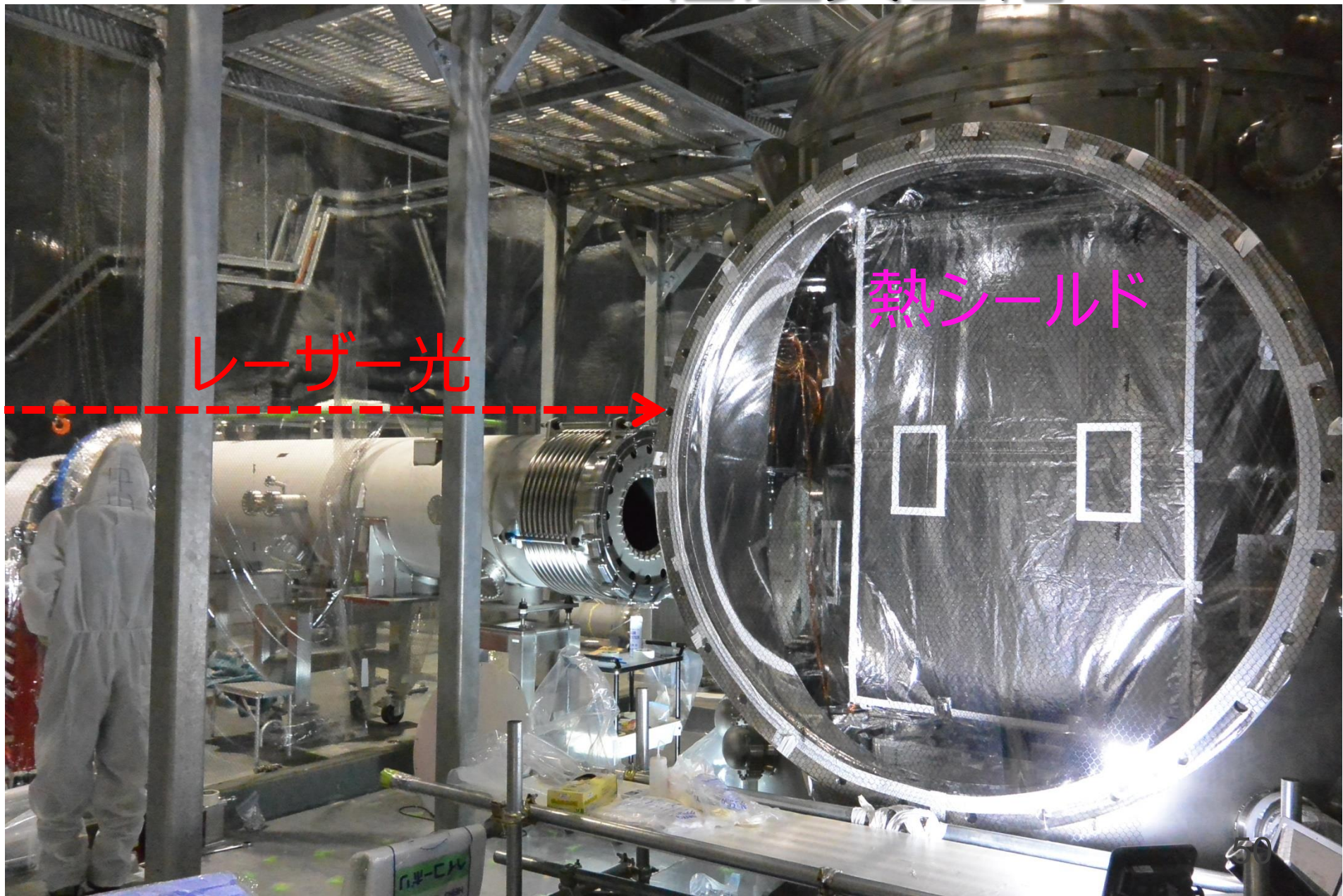


冷凍機



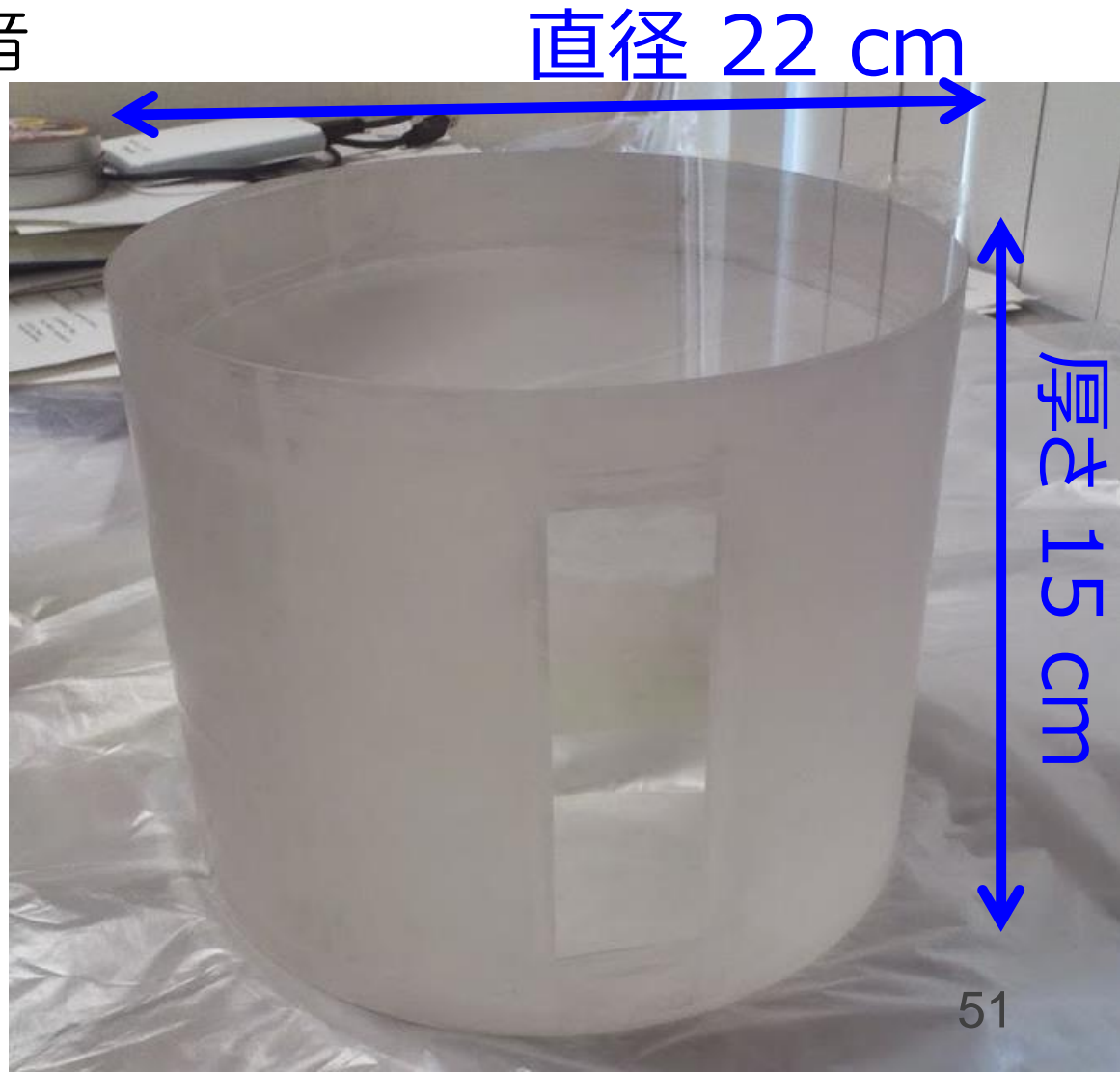
柏で実験中の冷凍機ユニット⁴⁹

KAGRAの低温真空槽



KAGRAの鏡

- 人工サファイア
- 低散逸→低熱雑音
- 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



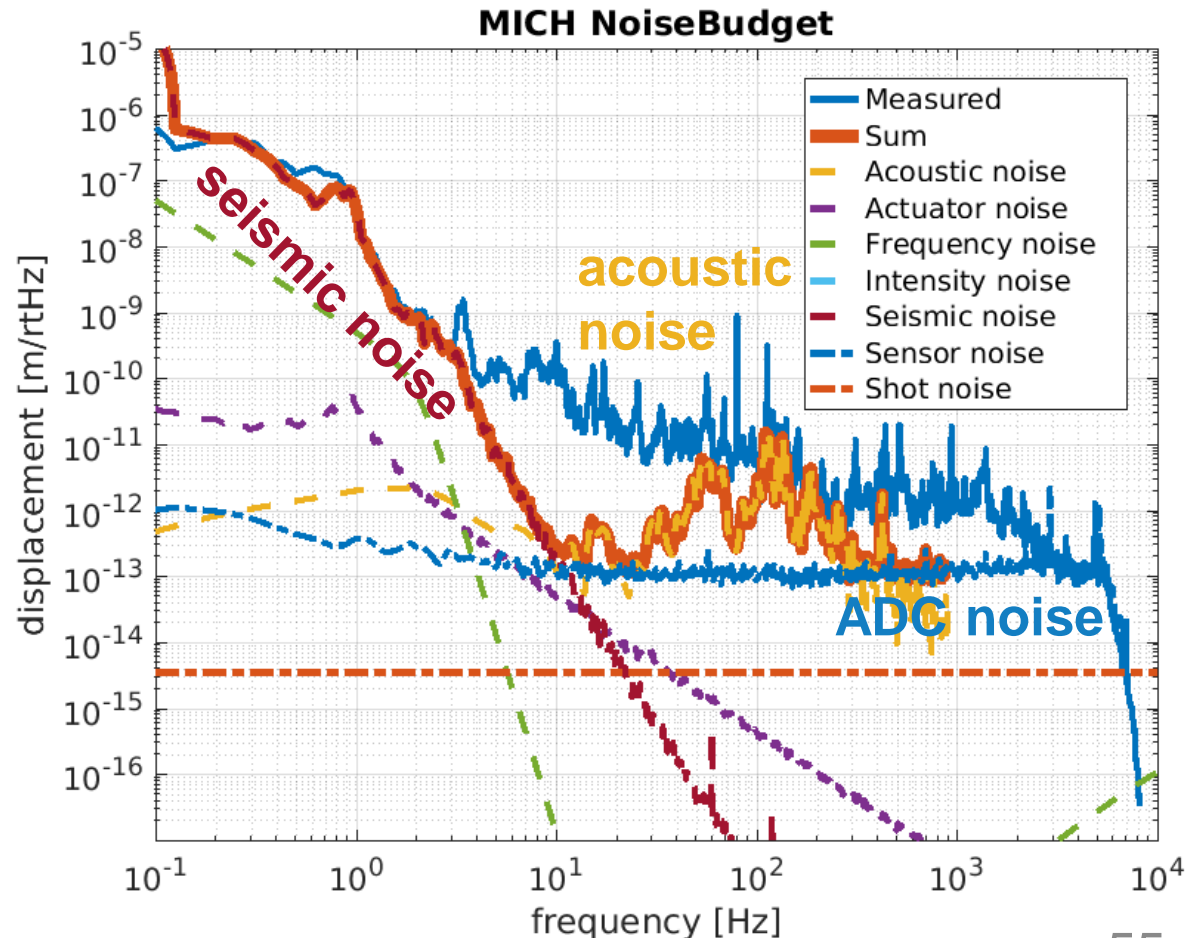
iKAGRA試験運転

- 2016年3月25日9:00 から 3月31日17:00
2016年4月11日9:00 から 4月25日17:00 の2期間
- 目的:
 - 片腕3kmに及ぶ真空槽・ダクトのレイアウト確認
 - 制御系、データ取得・転送・解析系の試験
 - 観測体制の確立
 - 地下の環境データの取得
 - km級干渉計運転の感覚をつかむ

iKAGRAの感度

- $\sim 3e-15$ /rtHz @ 100 Hz
- 地面振動、音響雑音、ADC雑音で制限

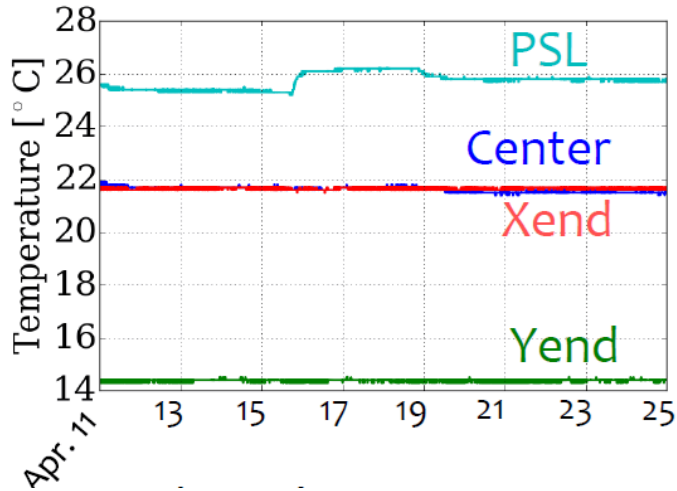
- 雑音源の特定に成功
- 極めて悪いがbKAGRAでは全て低減可能



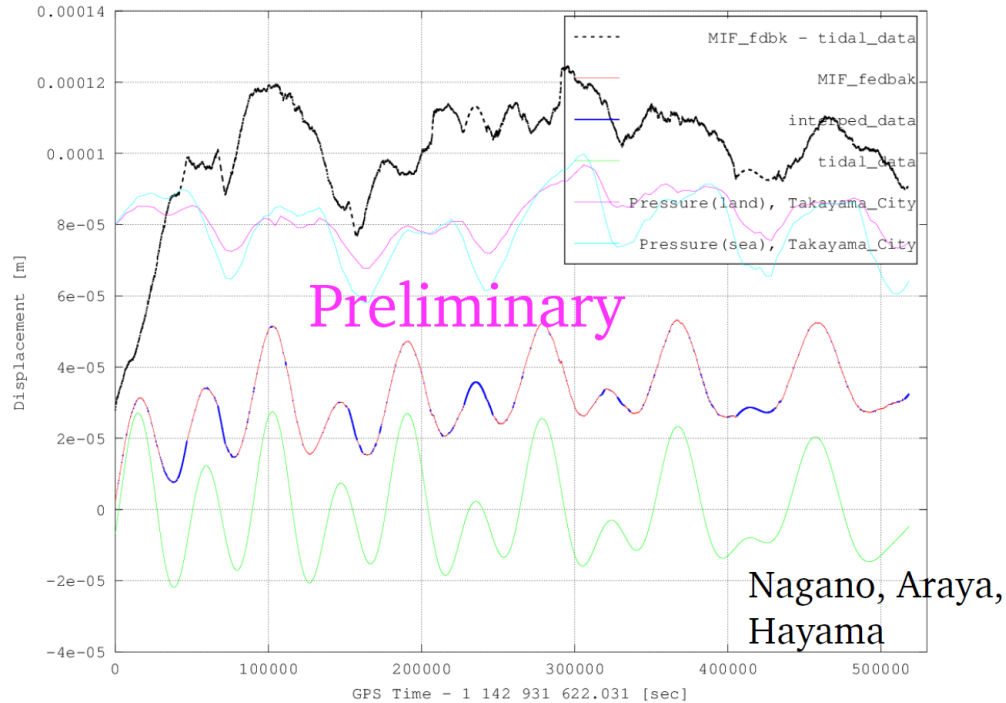
環境データ

- KAGRAの特殊な環境の評価

Temperature



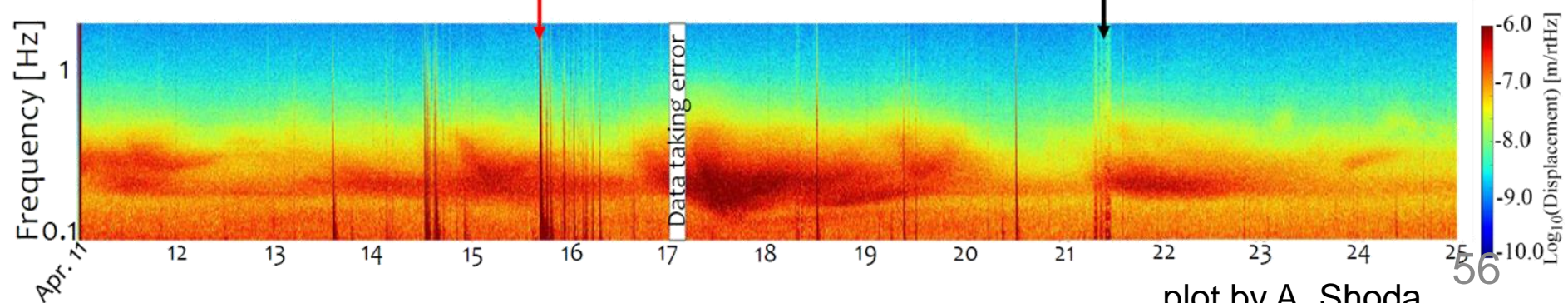
Tidal distortion



Seismic noise

Kumamoto earthquake (M5.7)

Data taking error



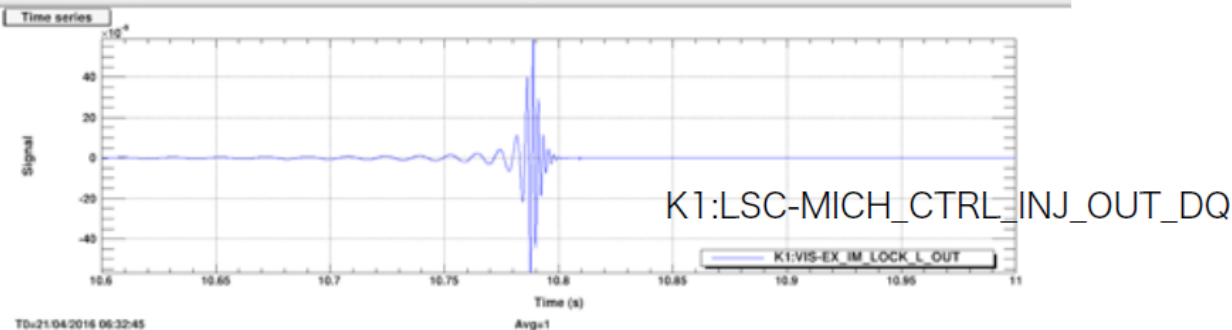
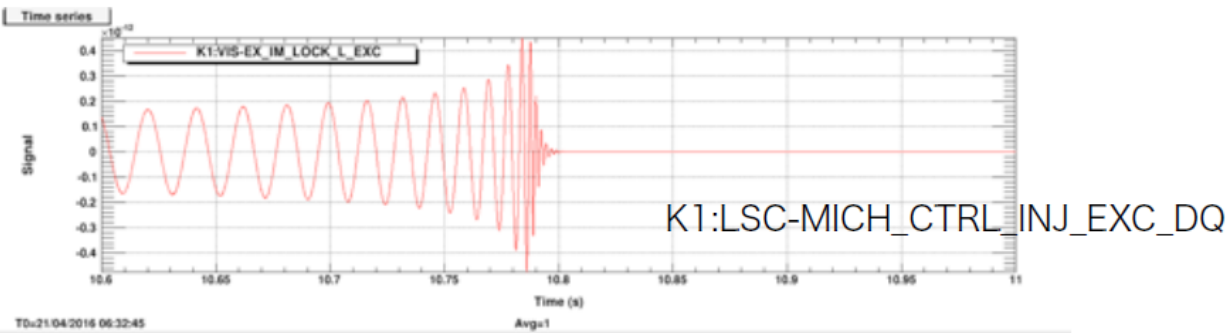
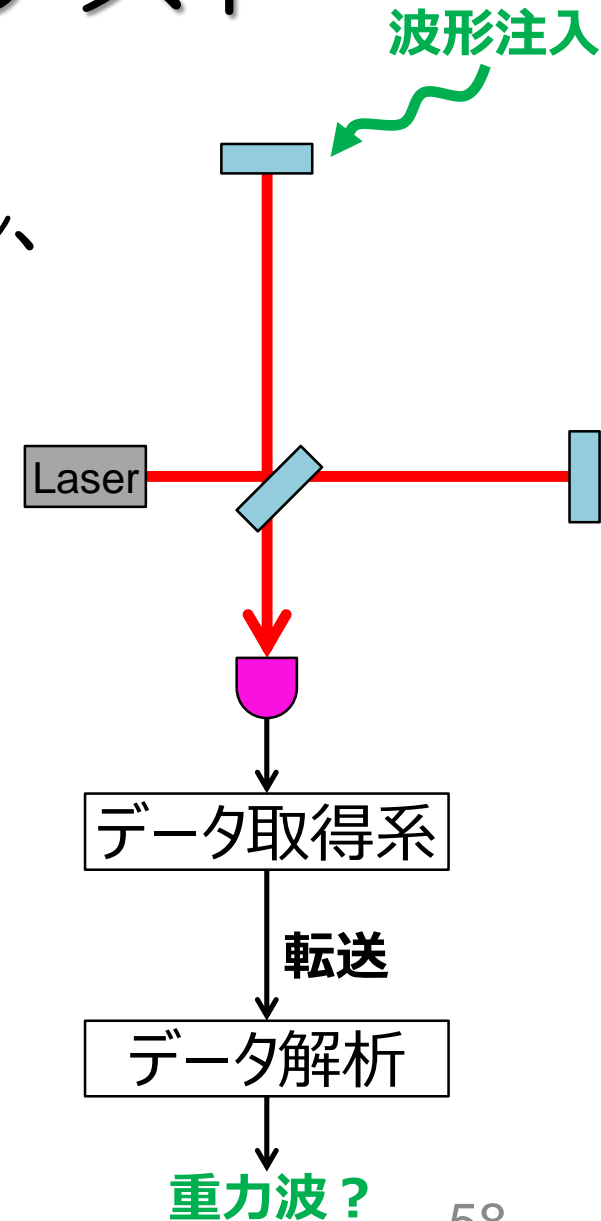
データ転送・解析

- リアルタイム転送 (遅延時間~3秒、~200 MB/sec)
東大宇宙線研(柏)
大阪市大
- オフライン転送
Academia Sinica
(台湾)
KISTI (韓国)
- 合計7.5 TBのデータ
重力波信号
環境信号
各種モニタ信号



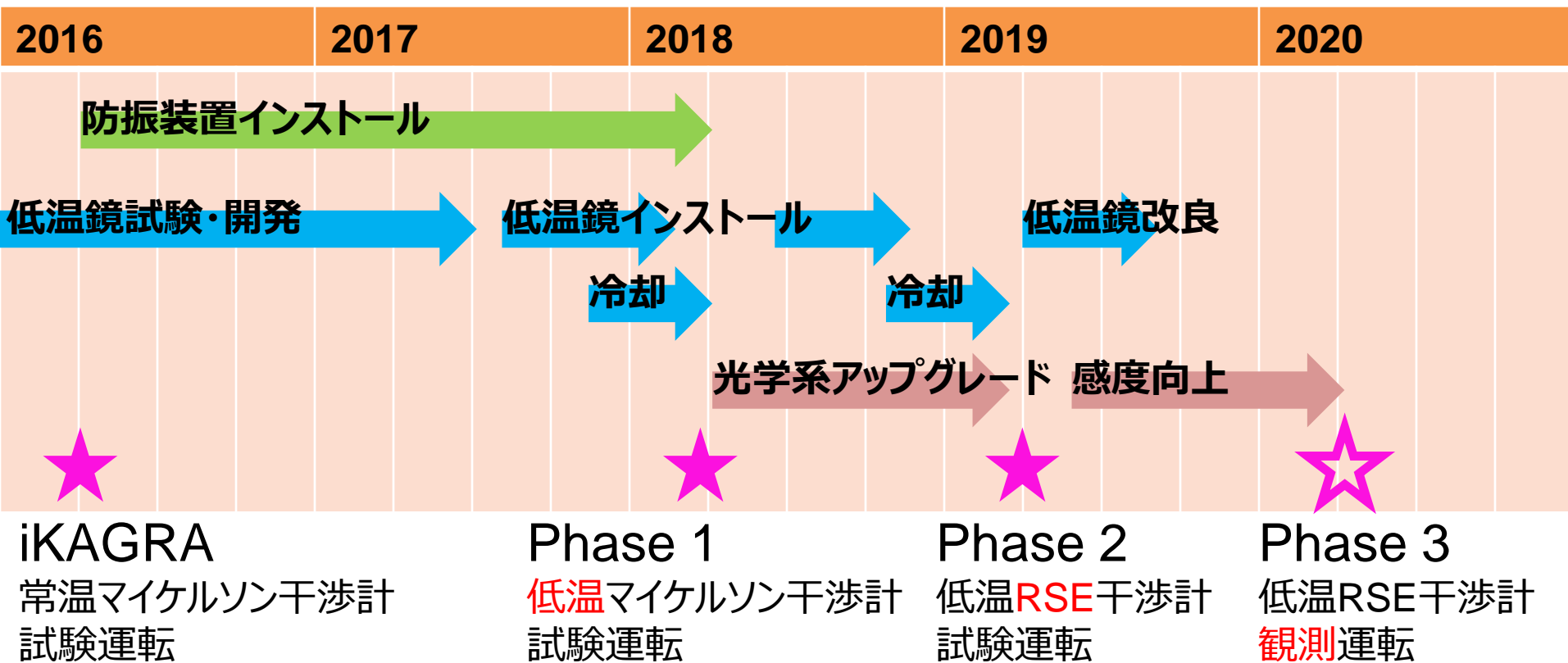
重力波信号の注入テスト

- 試験運転終了直後
- 生成した重力波波形で鏡を揺らし、信号を注入
- 干渉計から解析系までの重要な end-to-end test



KAGRAのロードマップ

- 段階的な開発
- 現状: 常温試験運転を終了
低温運転に向けて開発中



各国の将来計画

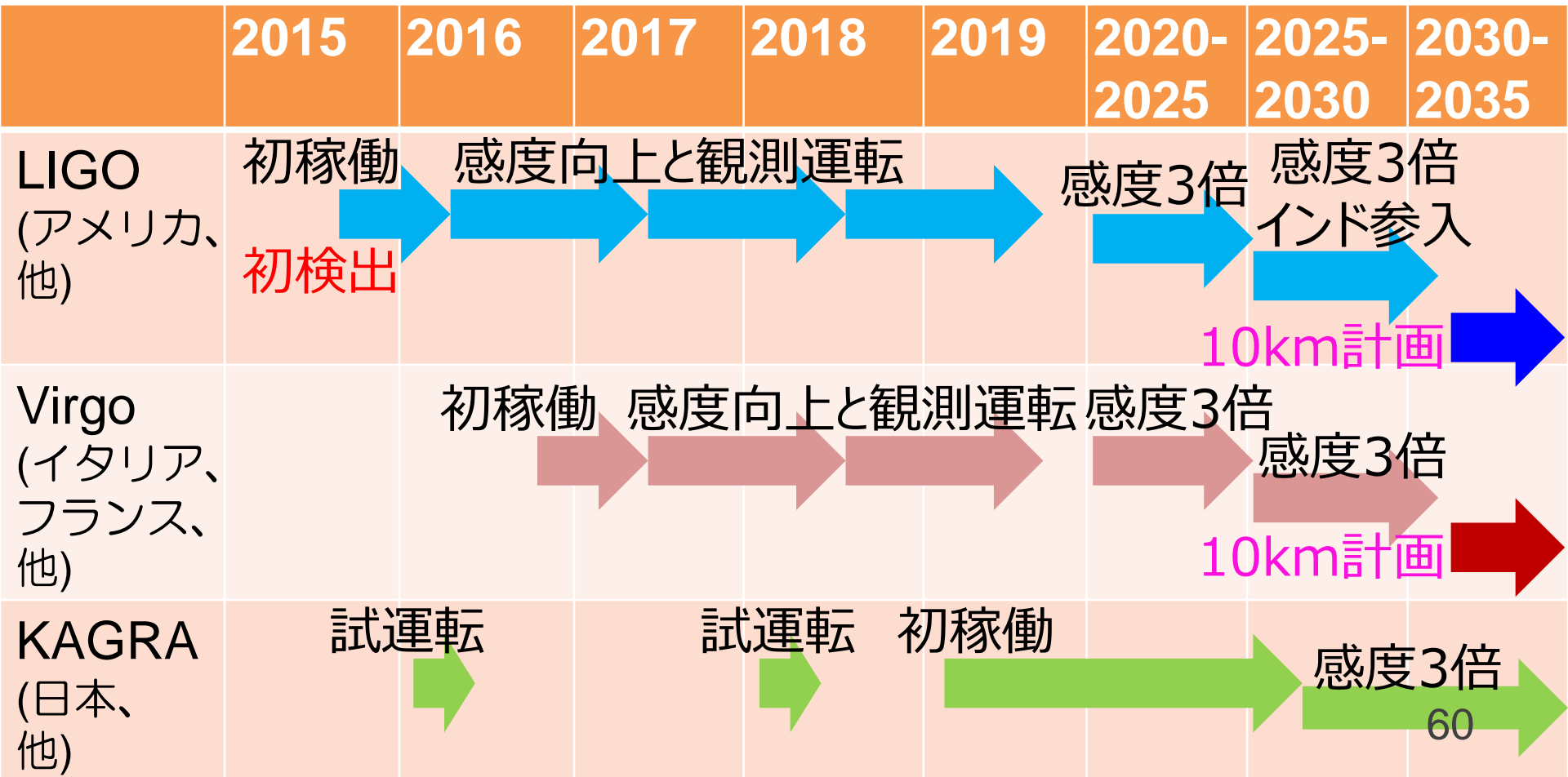
中性子星連星
からの重力波？

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？

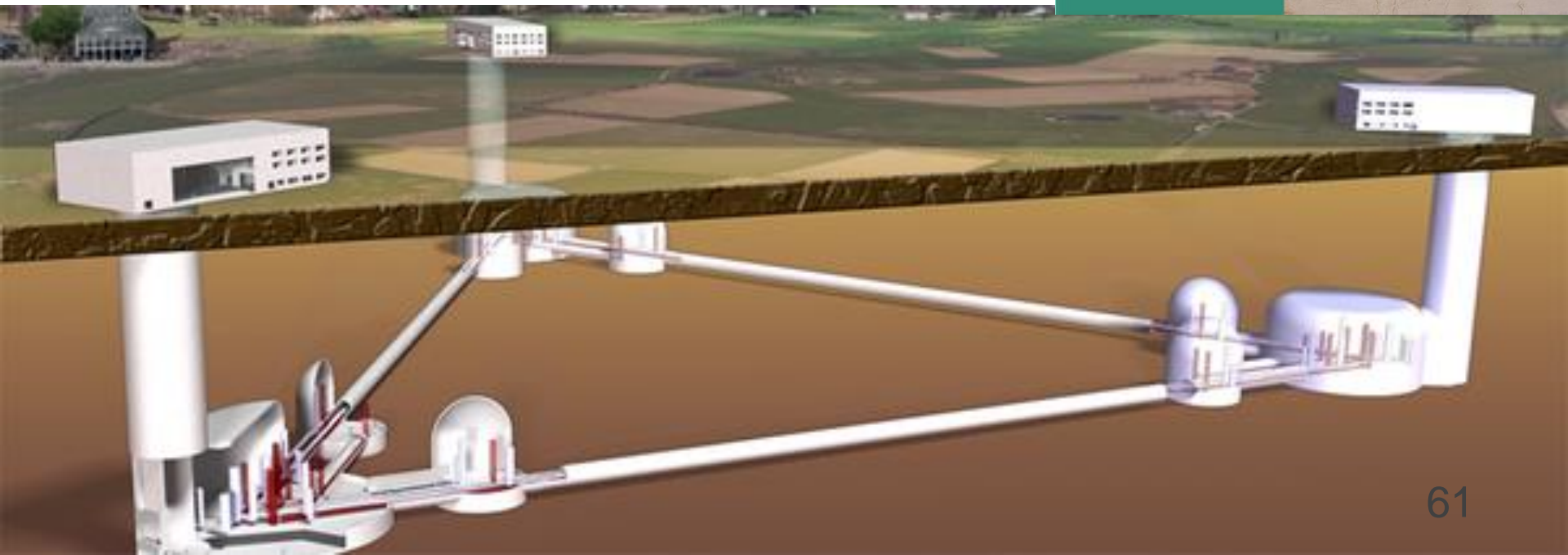
連星の
波源特定？

連星の形成
メカニズム解明？



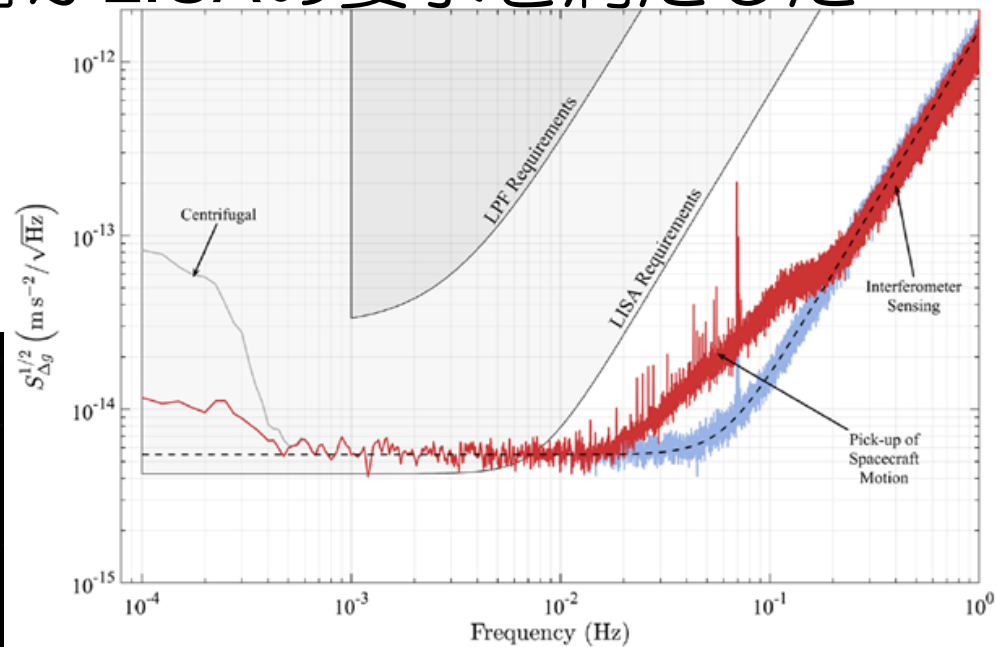
KAGRAと将来の10km計画

- 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



2016年のもう1つの重大ニュース

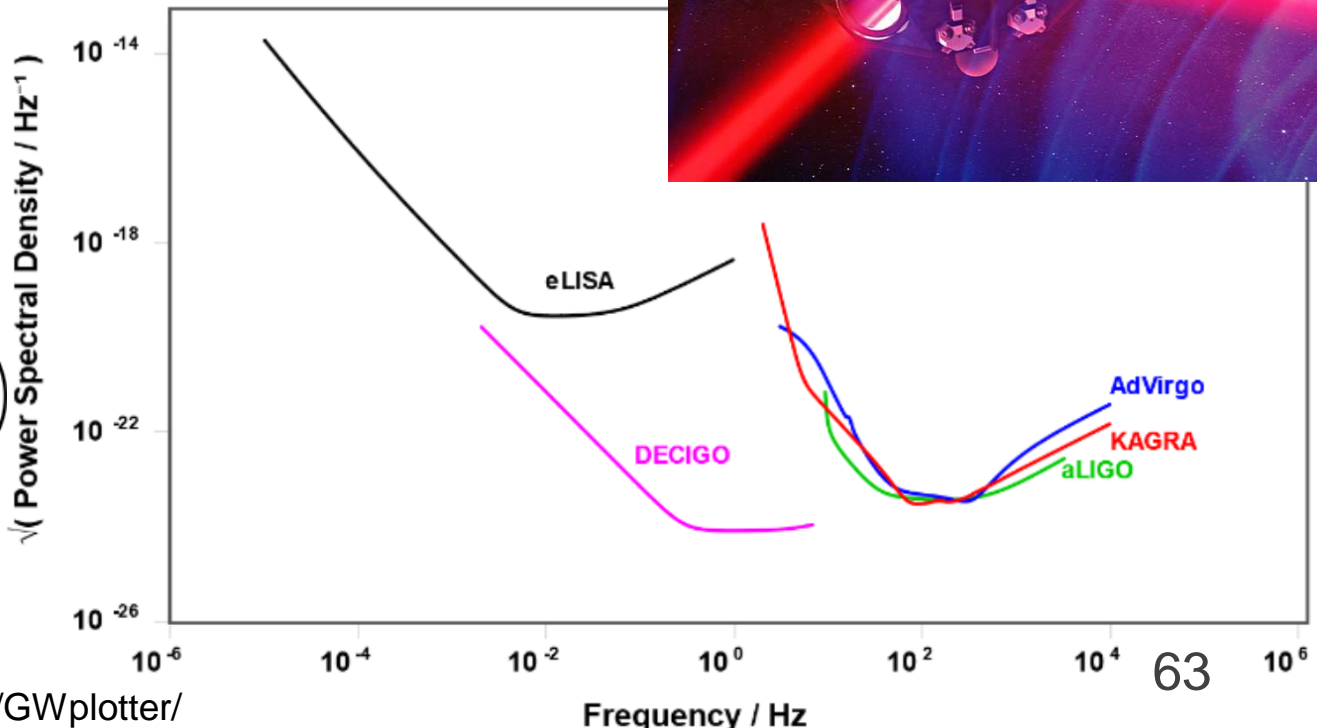
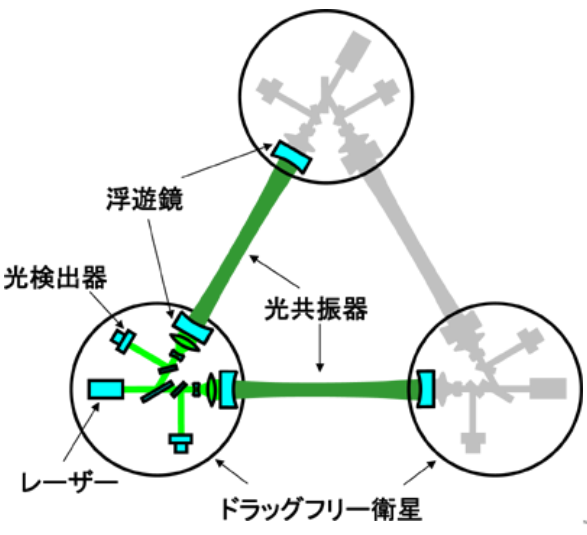
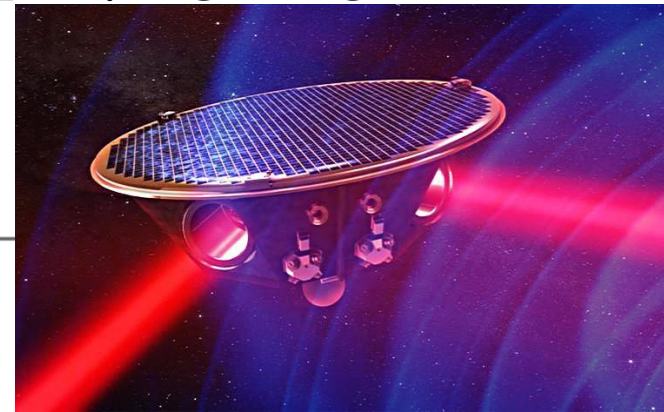
- LISA Pathfinderの**成功**
宇宙重力波望遠鏡LISAの技術実証機
- 2016年6月7日に最初の結果が公開された
- 加速度雑音と変位雑音がLISAの要求を満たした
- LISA実現へ
大きなステップ



M. Armano+, PRL 116, 231101 (2016)

宇宙重力波望遠鏡

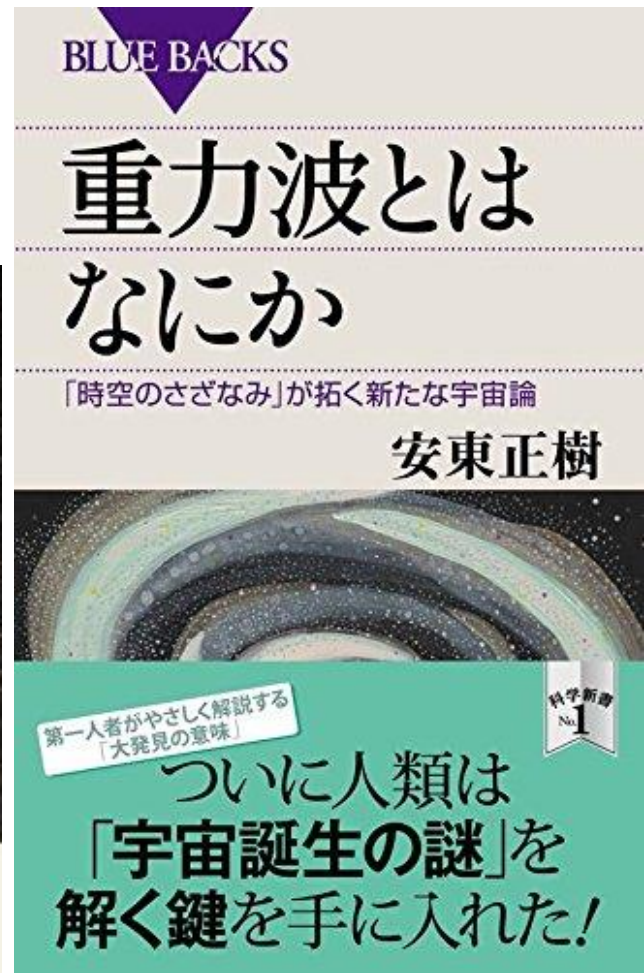
- 宇宙には地面振動がない
→ 低周波重力波の探査が可能
原始重力波、大質量BH連星、などなど
- LISA計画(欧州)
- DECIGO計画(日本)



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



真貝寿明

光文社新書 774