

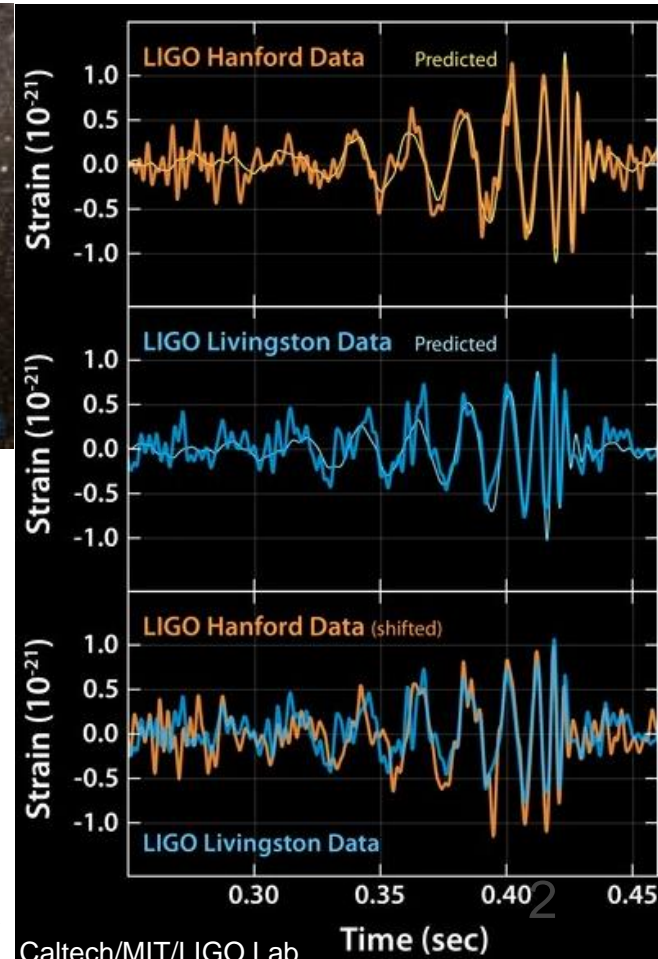
重力波天文学の夜明けとKAGRA

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



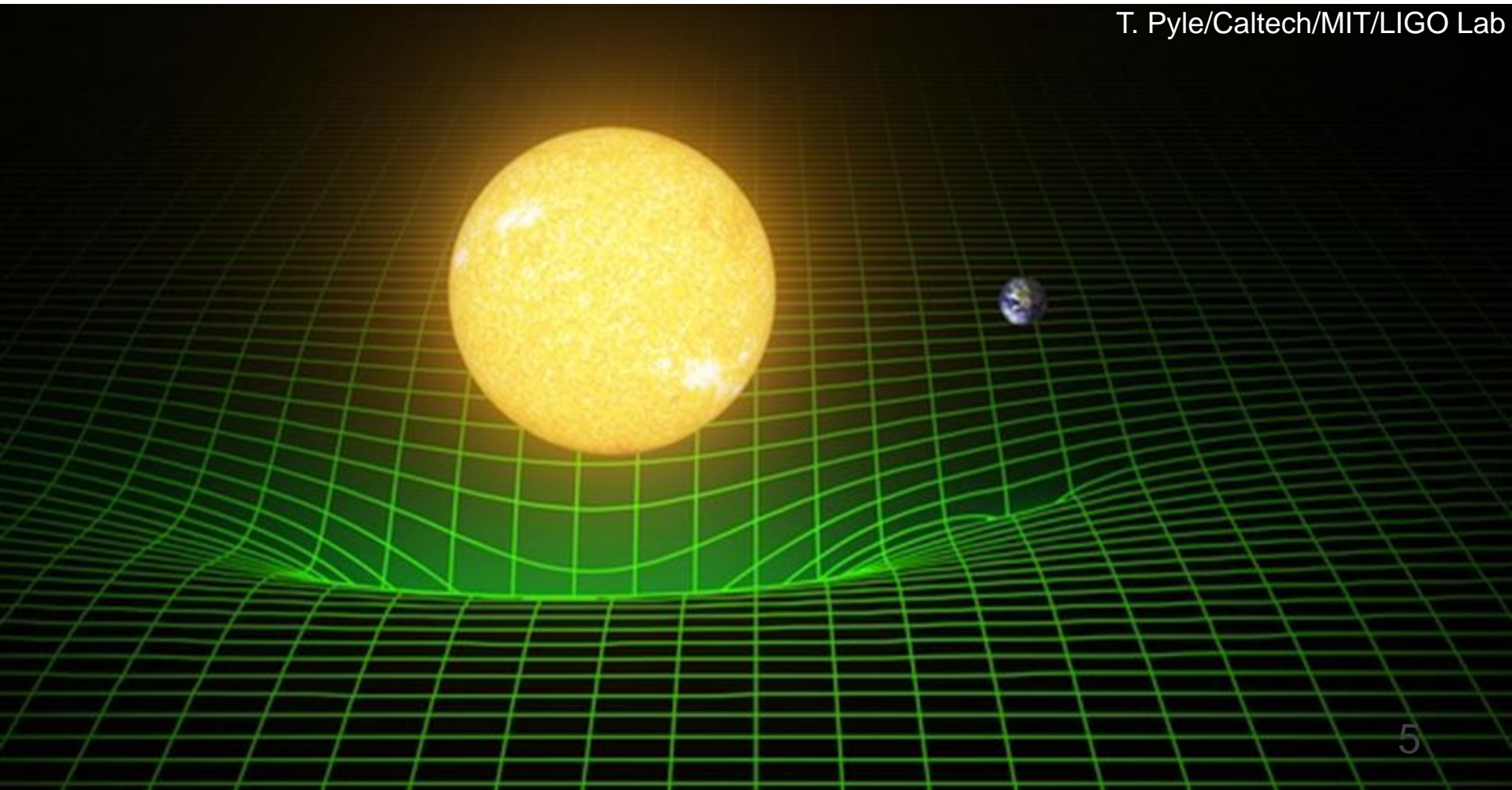
今回のお話

- **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
- 重力波望遠鏡の未来
 - 将来計画、宇宙計画

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

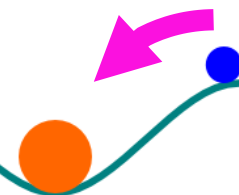
- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

なにもないトランポリンは平ら



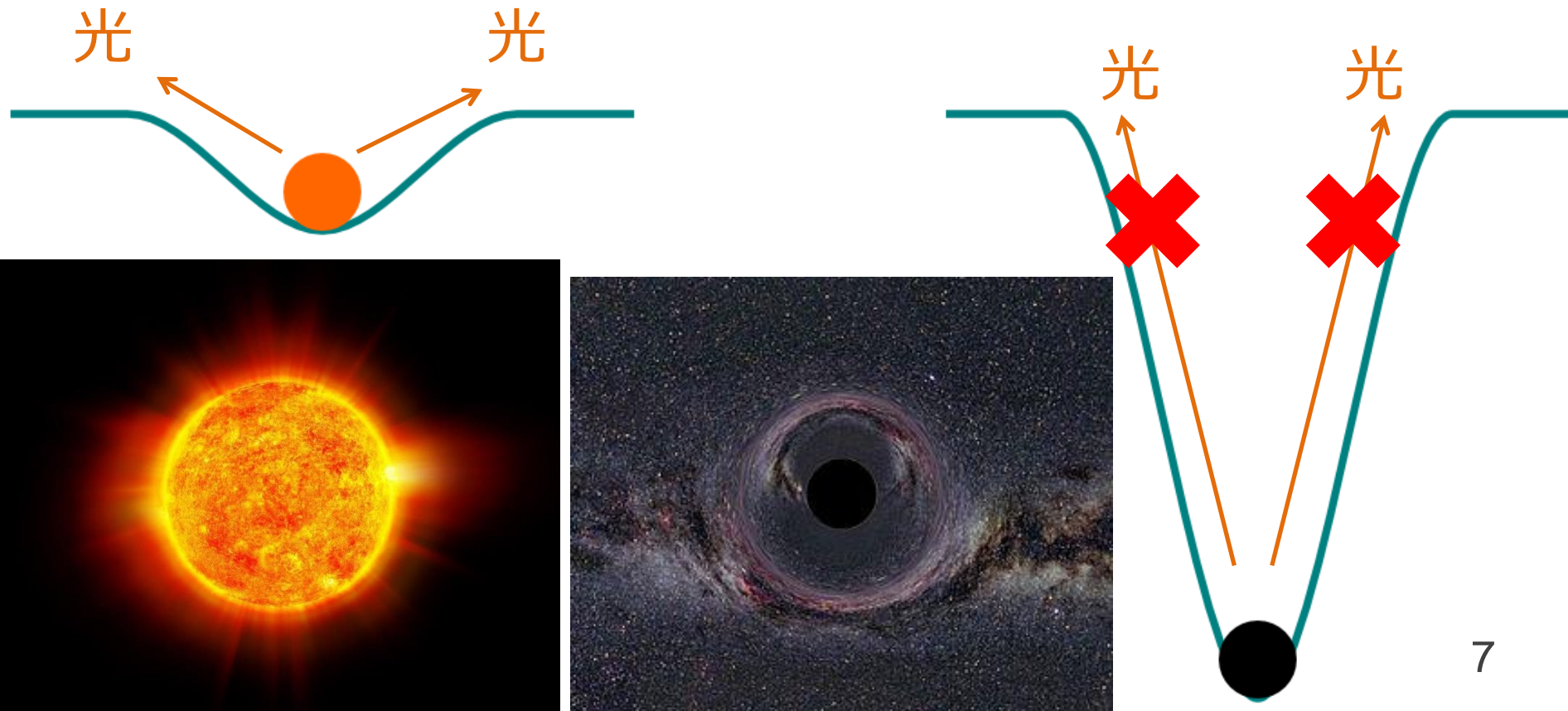
ボールを置くと
トランポリンが歪む

近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる



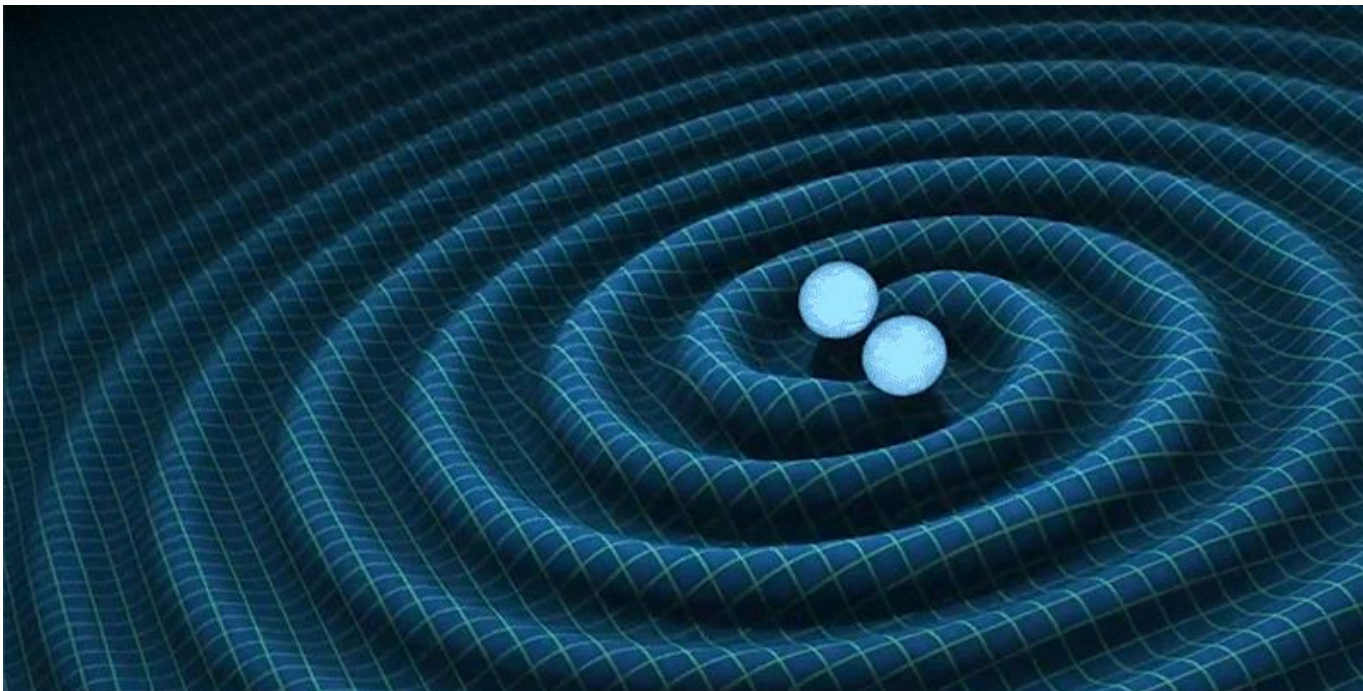
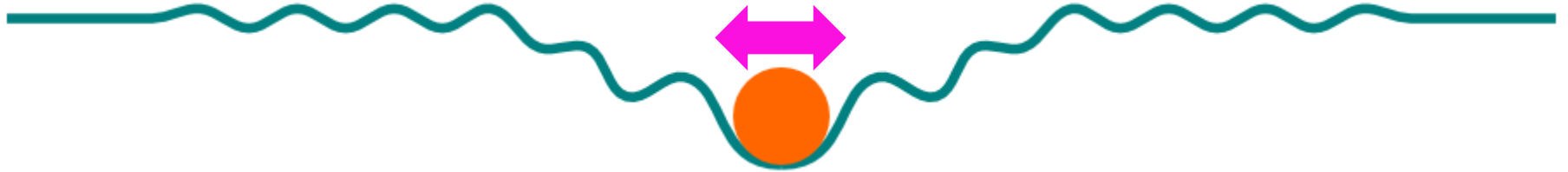
ブラックホール

- 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」

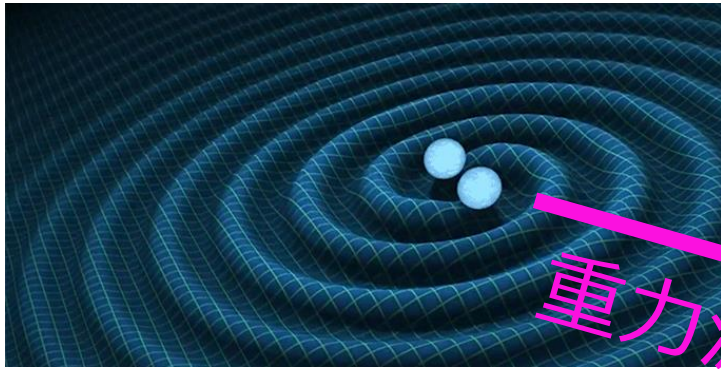
- 物体が動くと空間の歪みが増え、光の速さで伝搬する → これが重力波



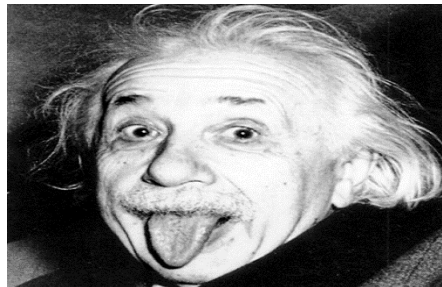
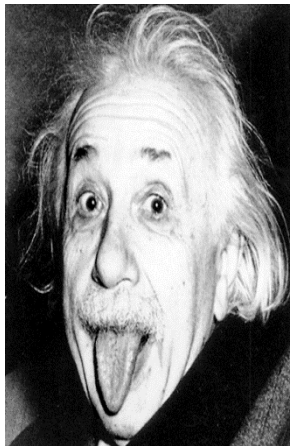
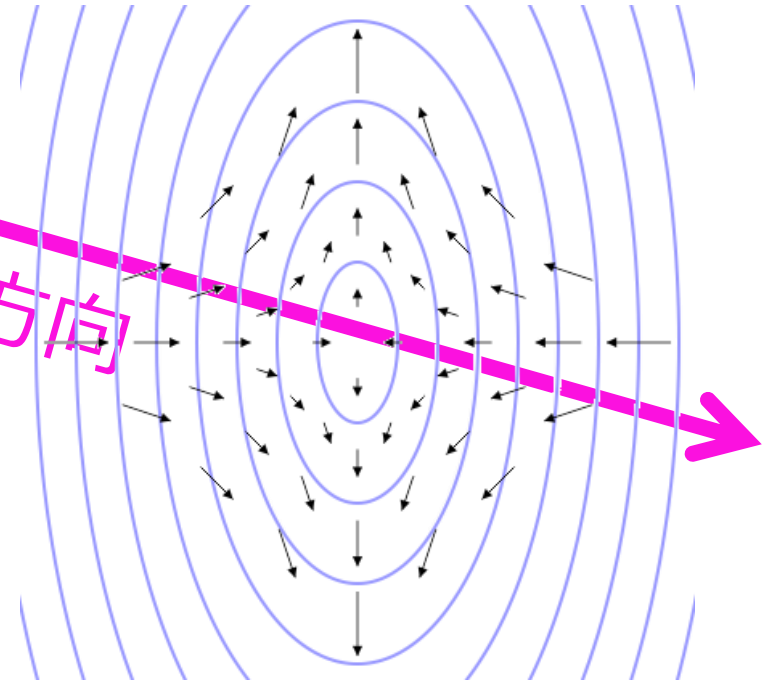
水の波紋
に似ている

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)

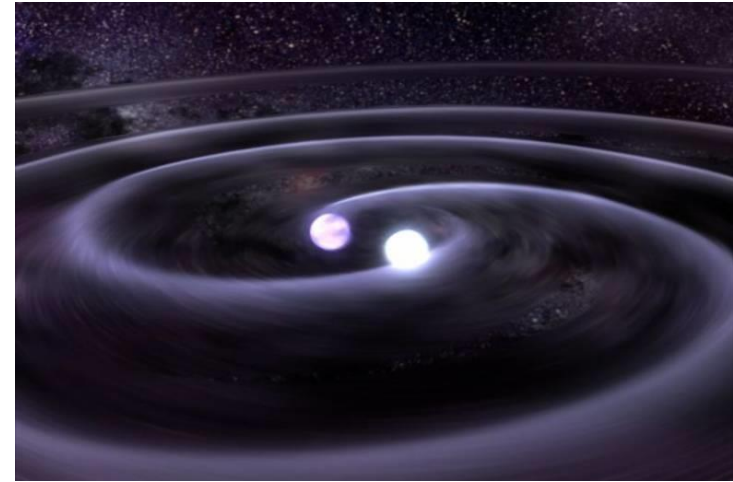


重力波の伝わる方向



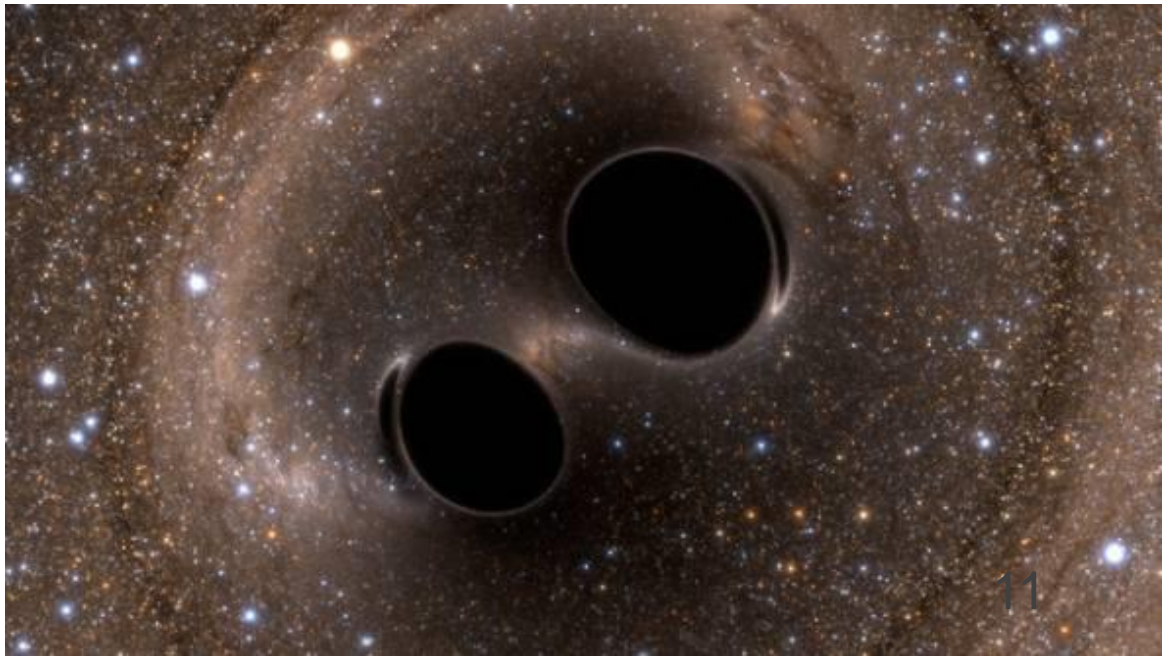
重力波源となり得る天体現象

- とても重く、
とても速く動く天体

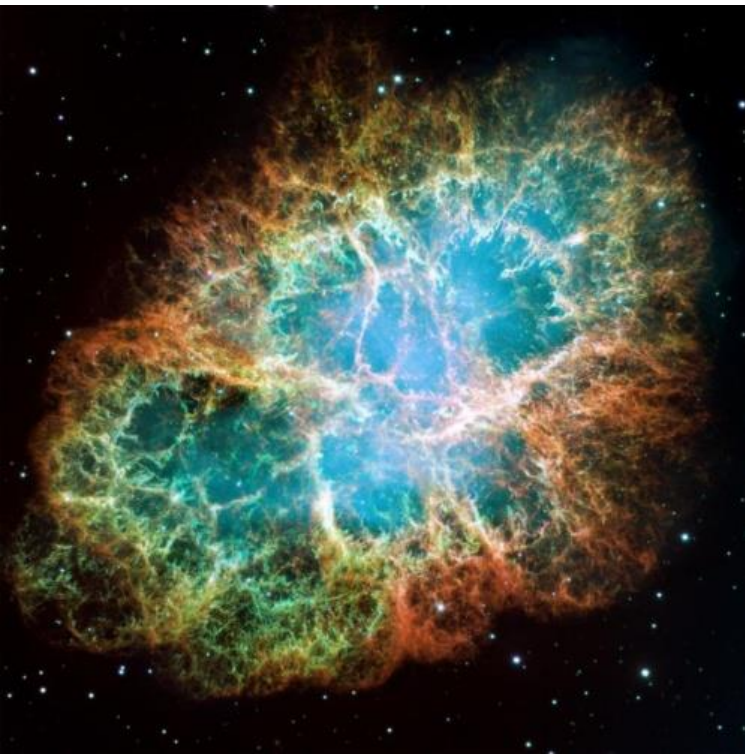


中性子星連星

ブラックホール連星



超新星爆発



重力波で何がわかる？

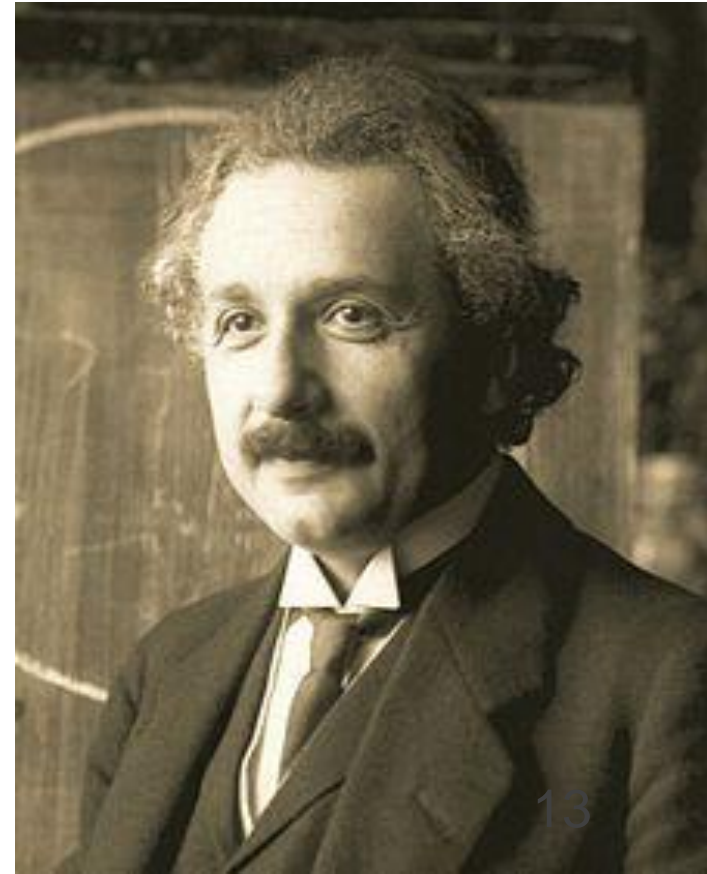
- **星の中**を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

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

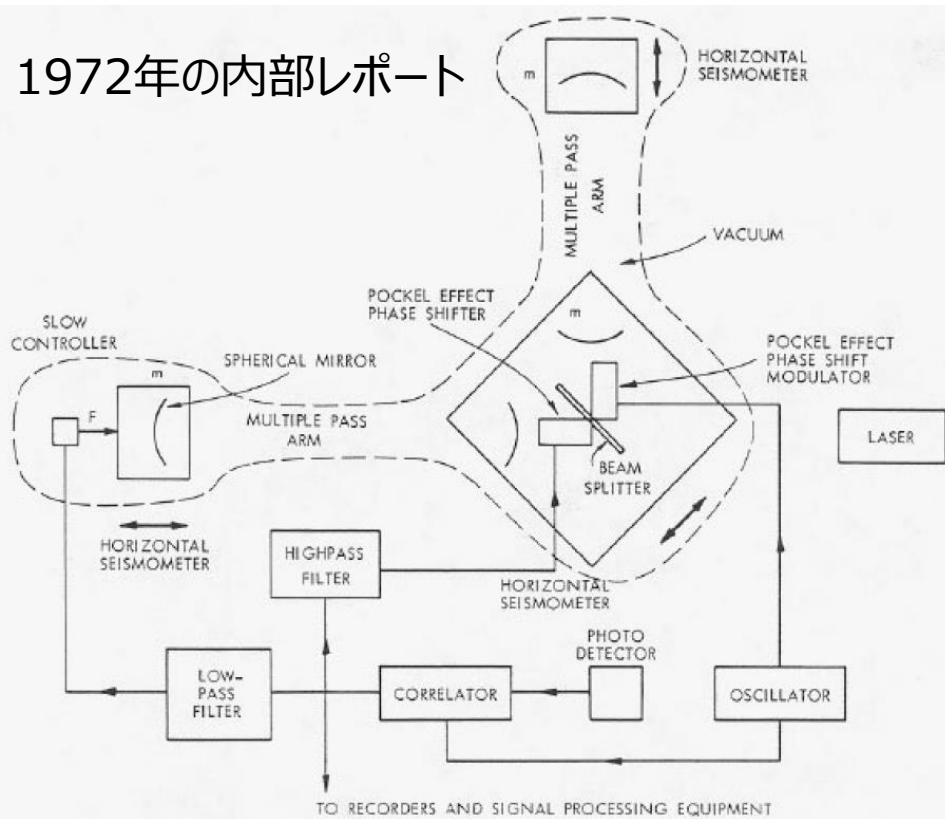
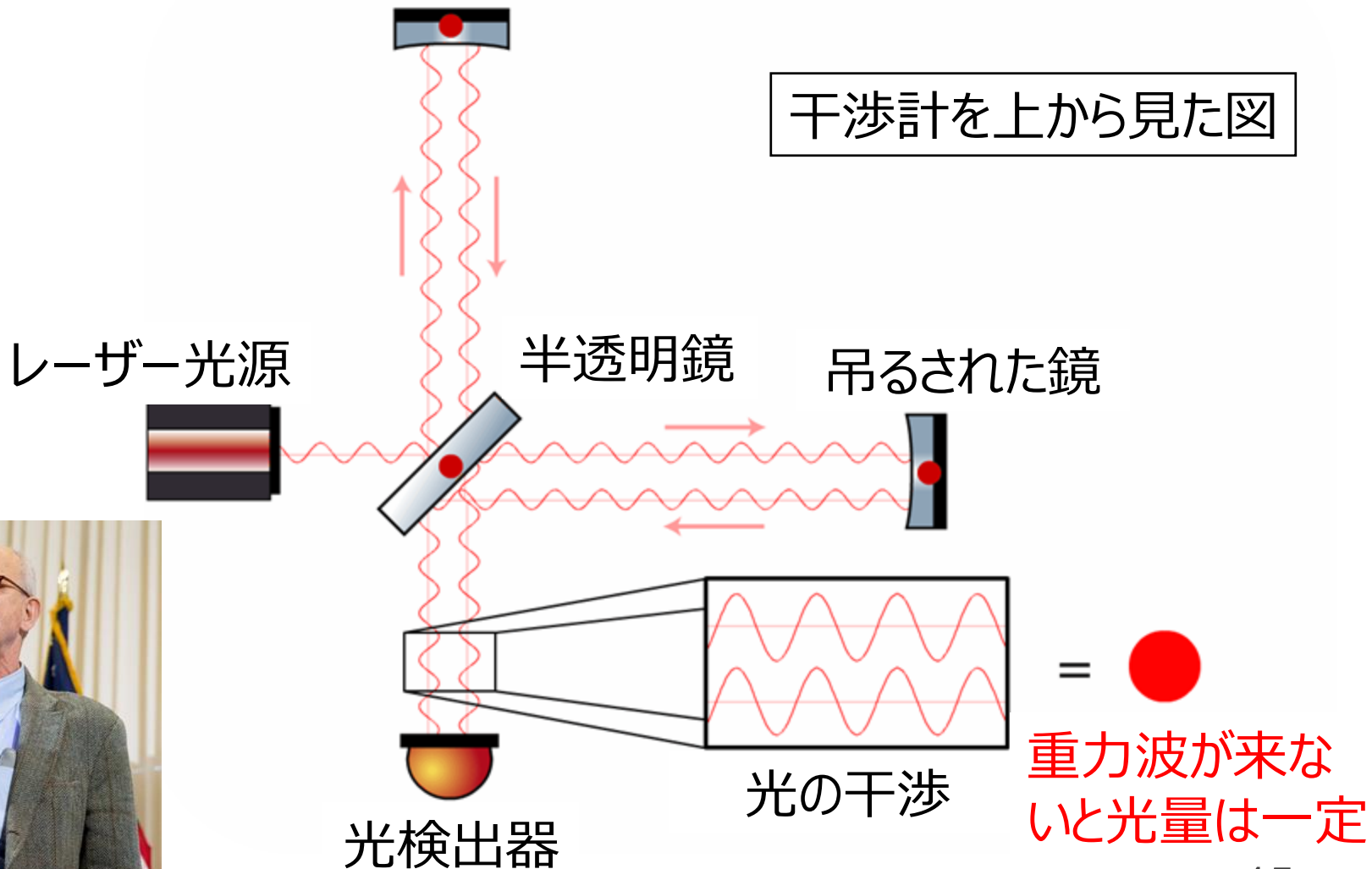


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



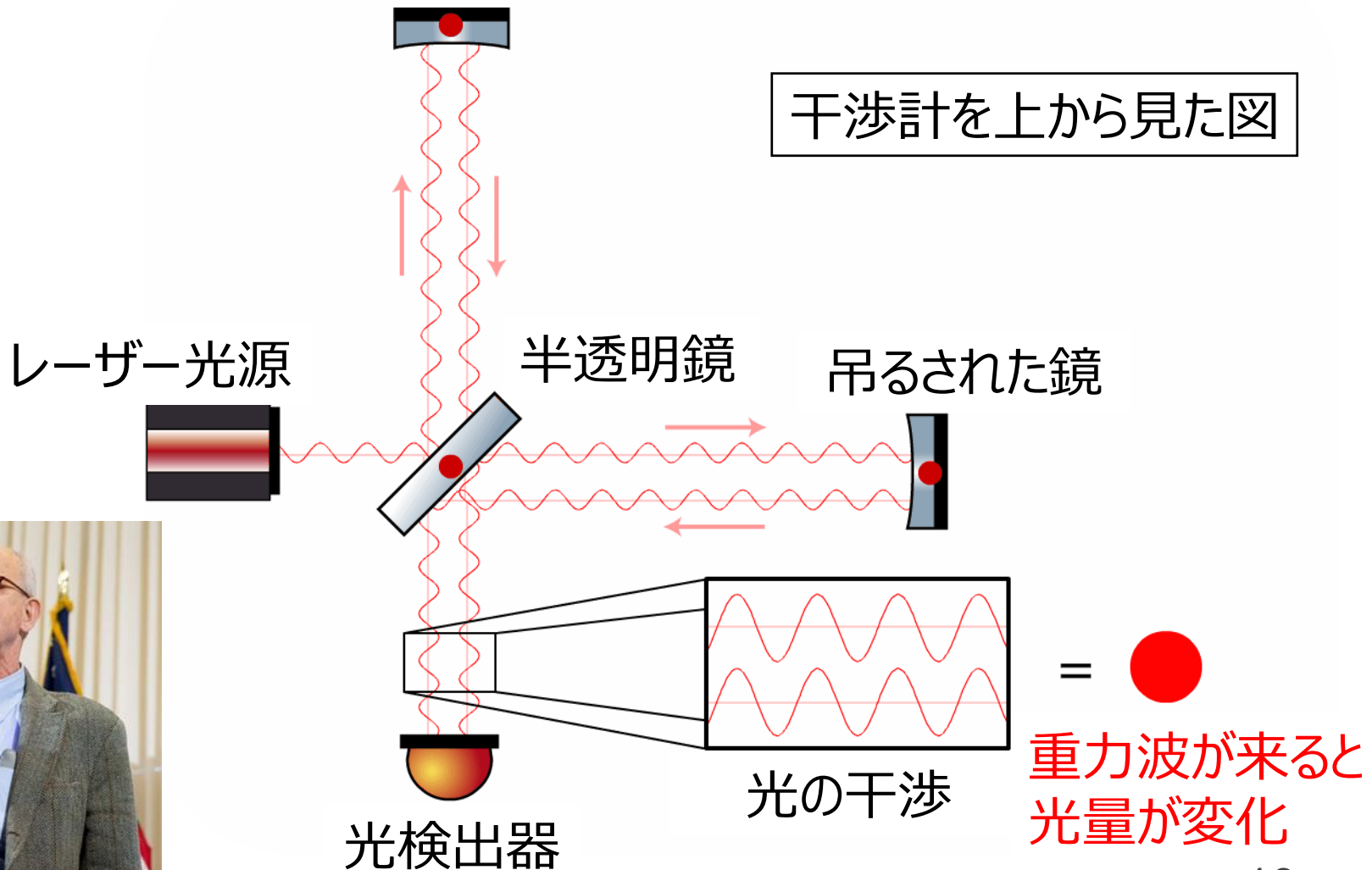
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



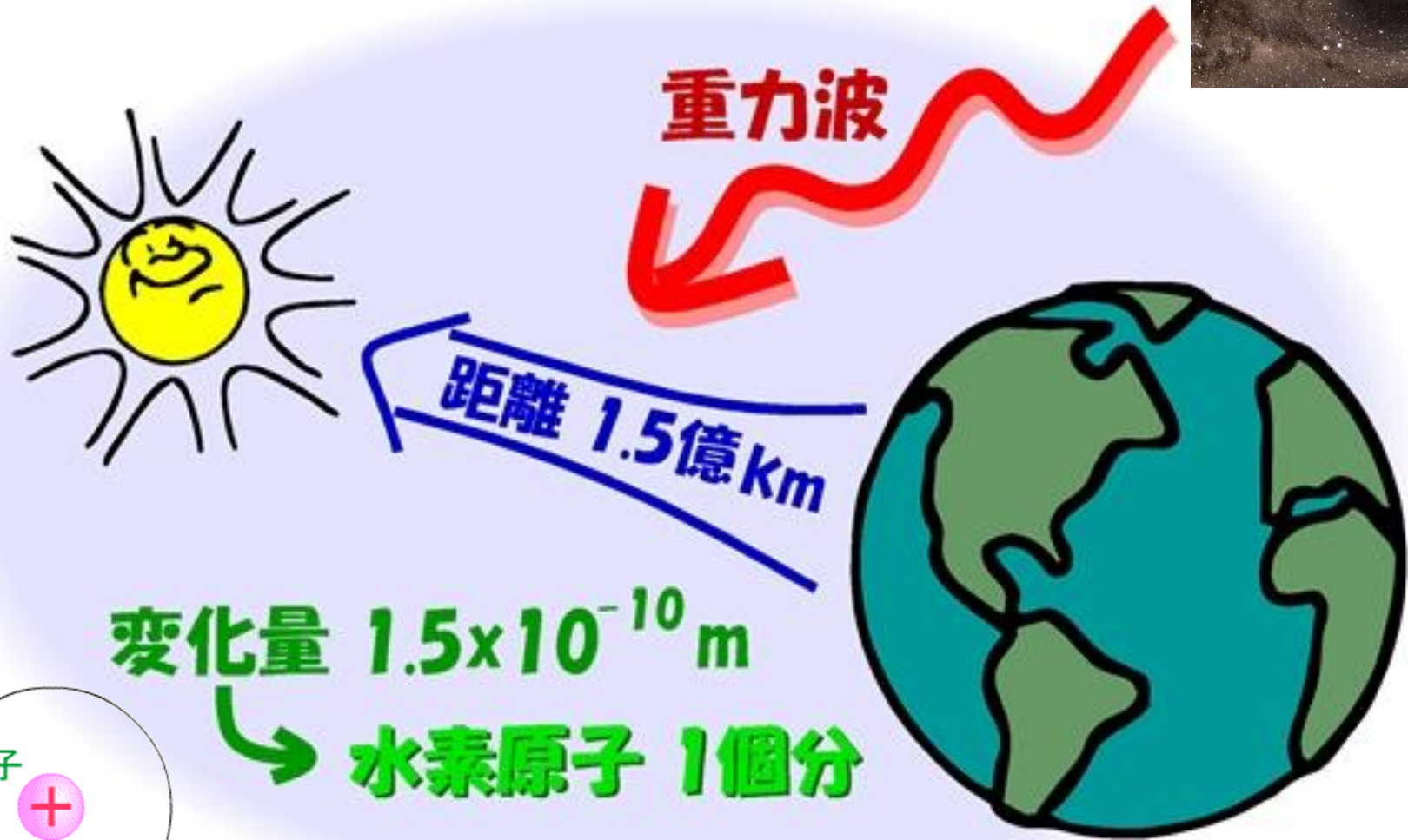
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



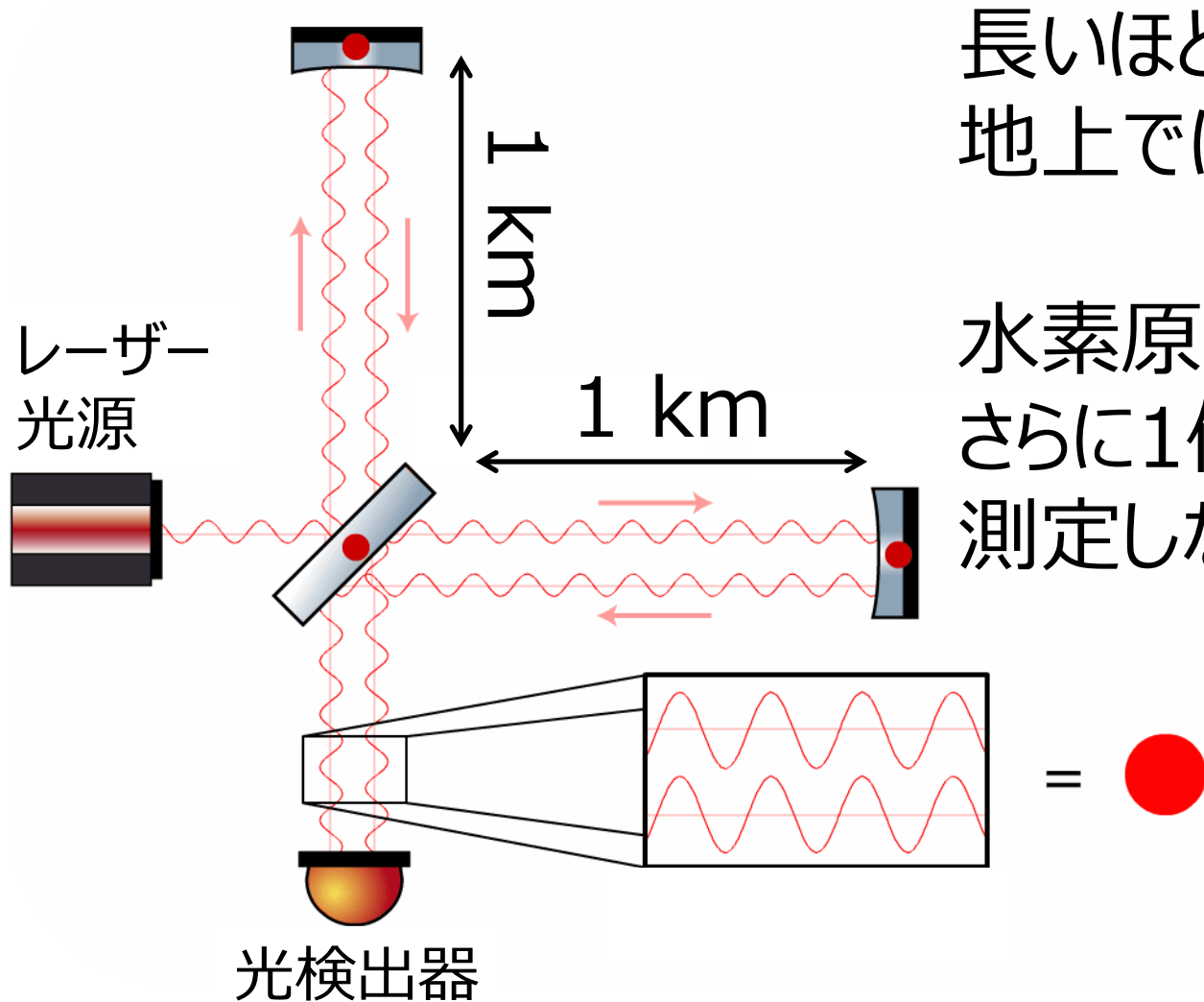
重力波の振幅はどれくらい？

- 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

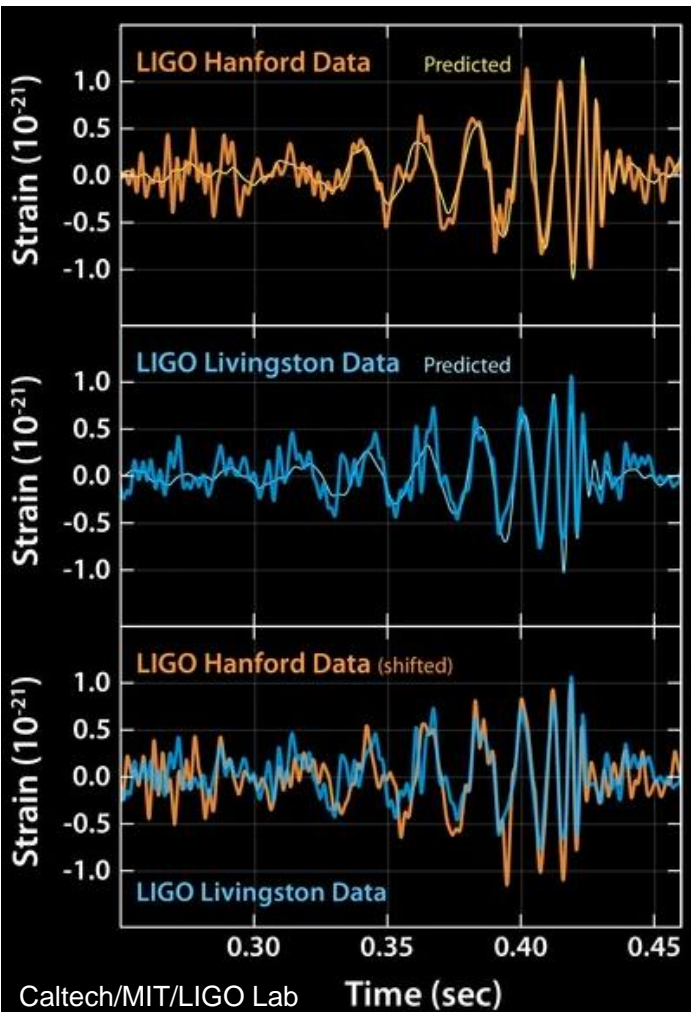
- 1916年 アインシュタインが重力波を**予言**
- 1960年代 ヴァイスが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始
LIGO (アメリカ 4km)、TAMA300 (日本 300m)、
GEO600 (ドイツ 600m)、Virgo (イタリア 3km)
→ 重力波は**見つからず**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 Advanced LIGOが
初稼働
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表
**予言から100年、
提案から50年！**

初検出を発表するライツィー

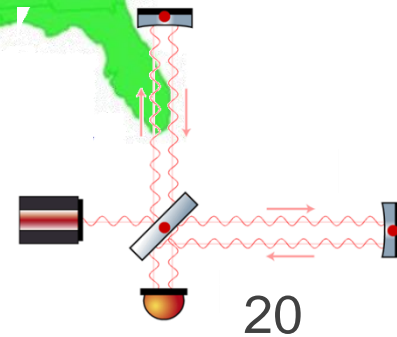


アメリカのLIGOによる初検出

- 3000 km離れた2台の望遠鏡でほぼ同時に同じ波形を検出

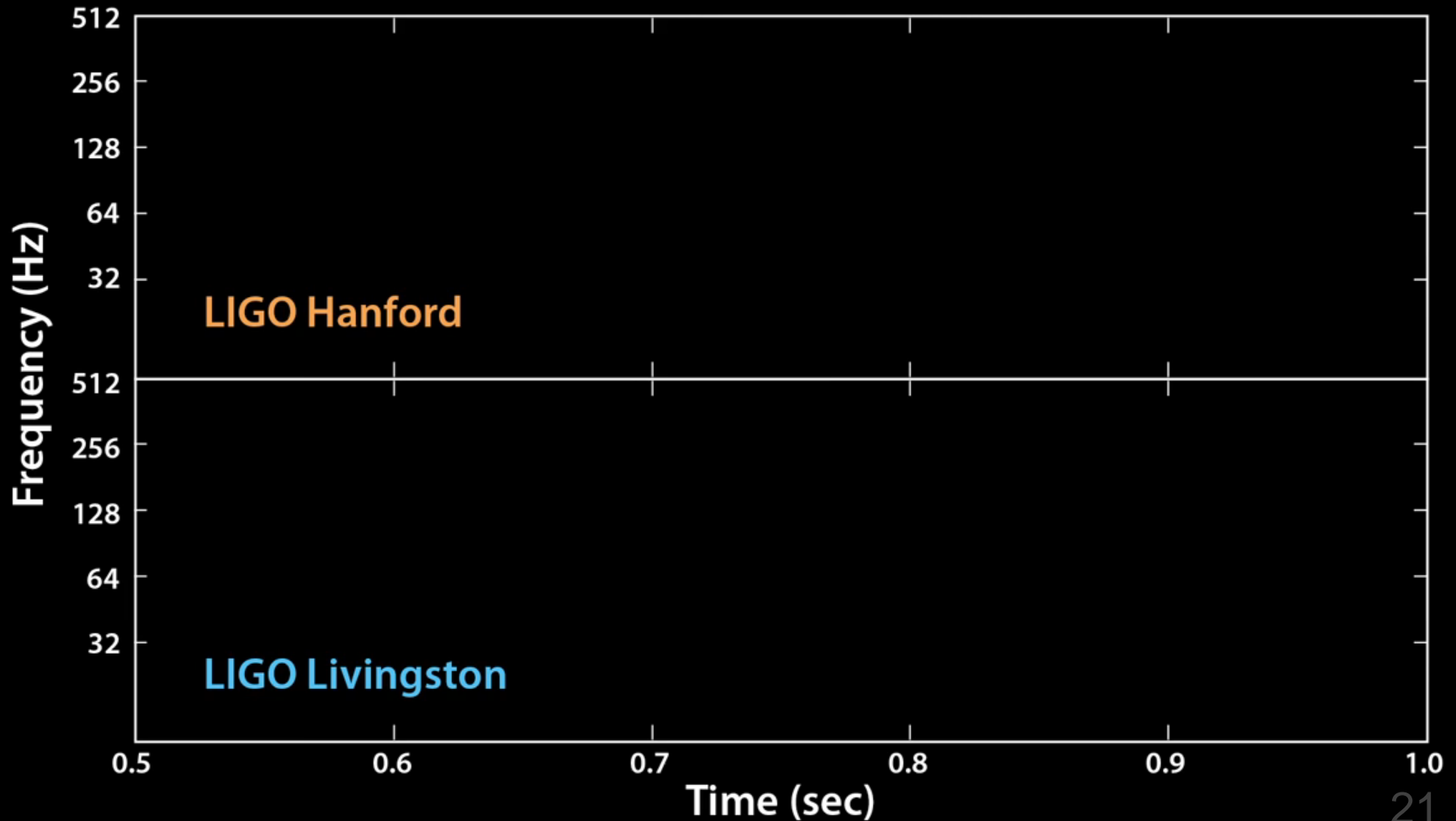


ハンフォード
観測所



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



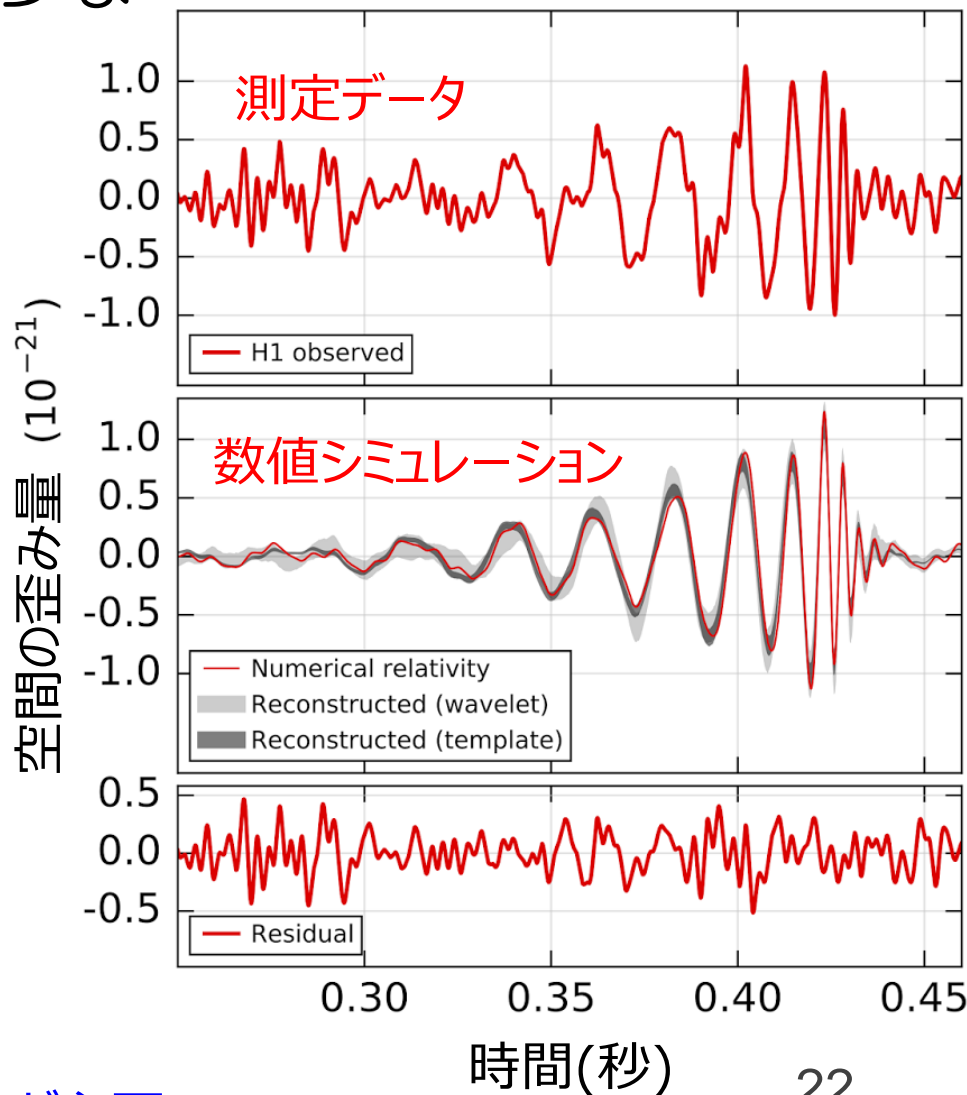
波形が相対論の計算とぴったり

- 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
重力波のすごいところ！

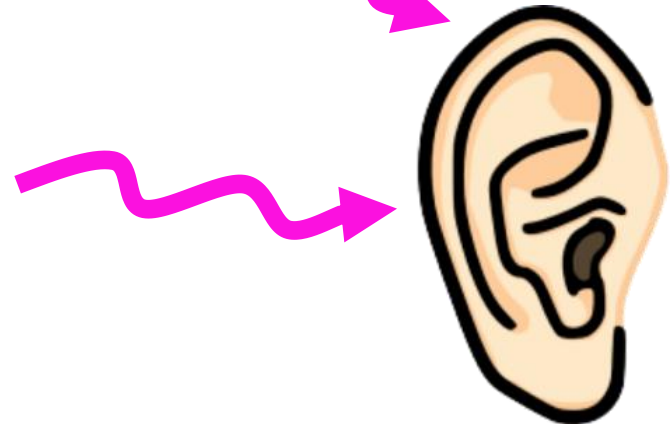
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

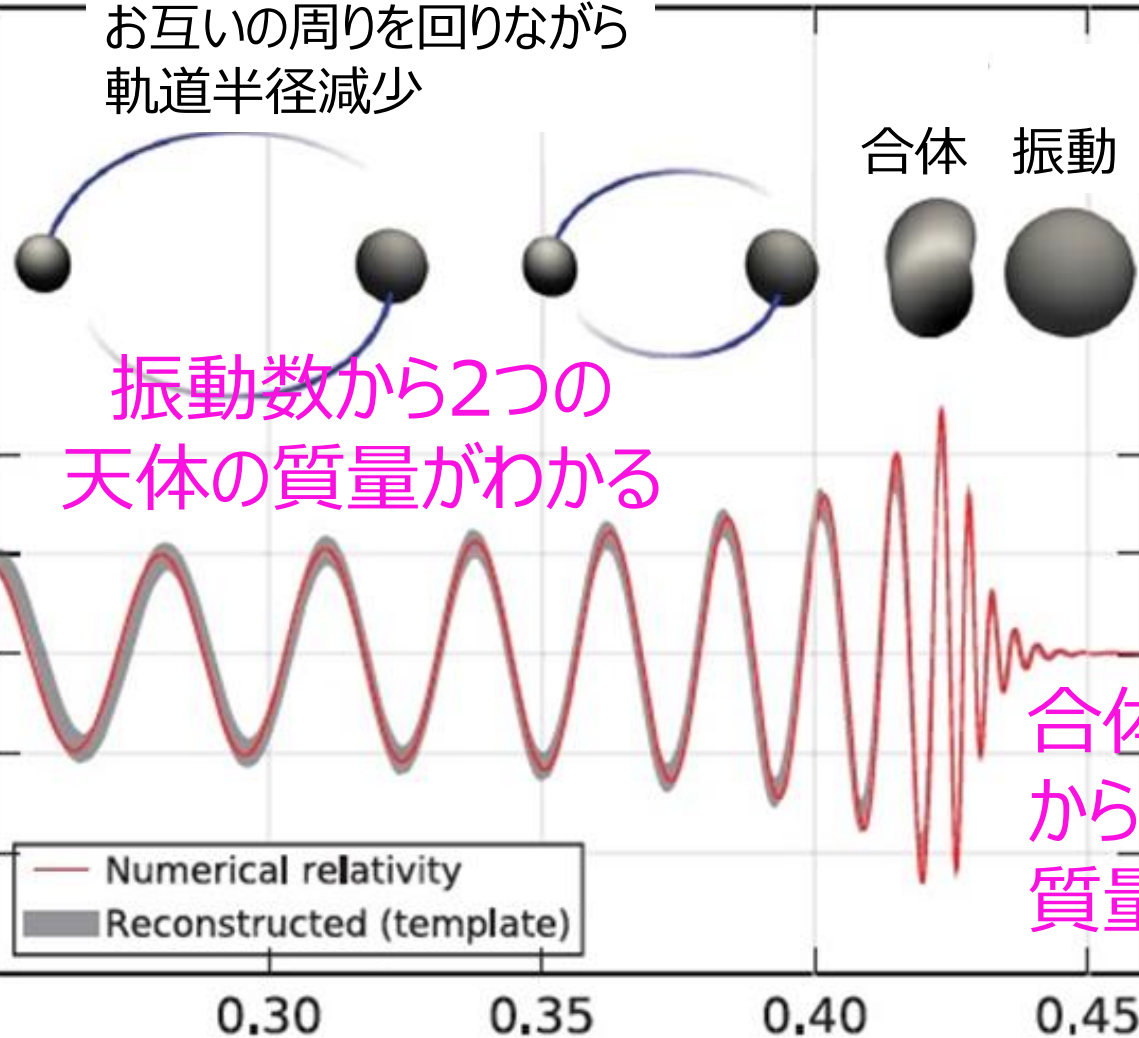


重力波形から何がわかるか？

- 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

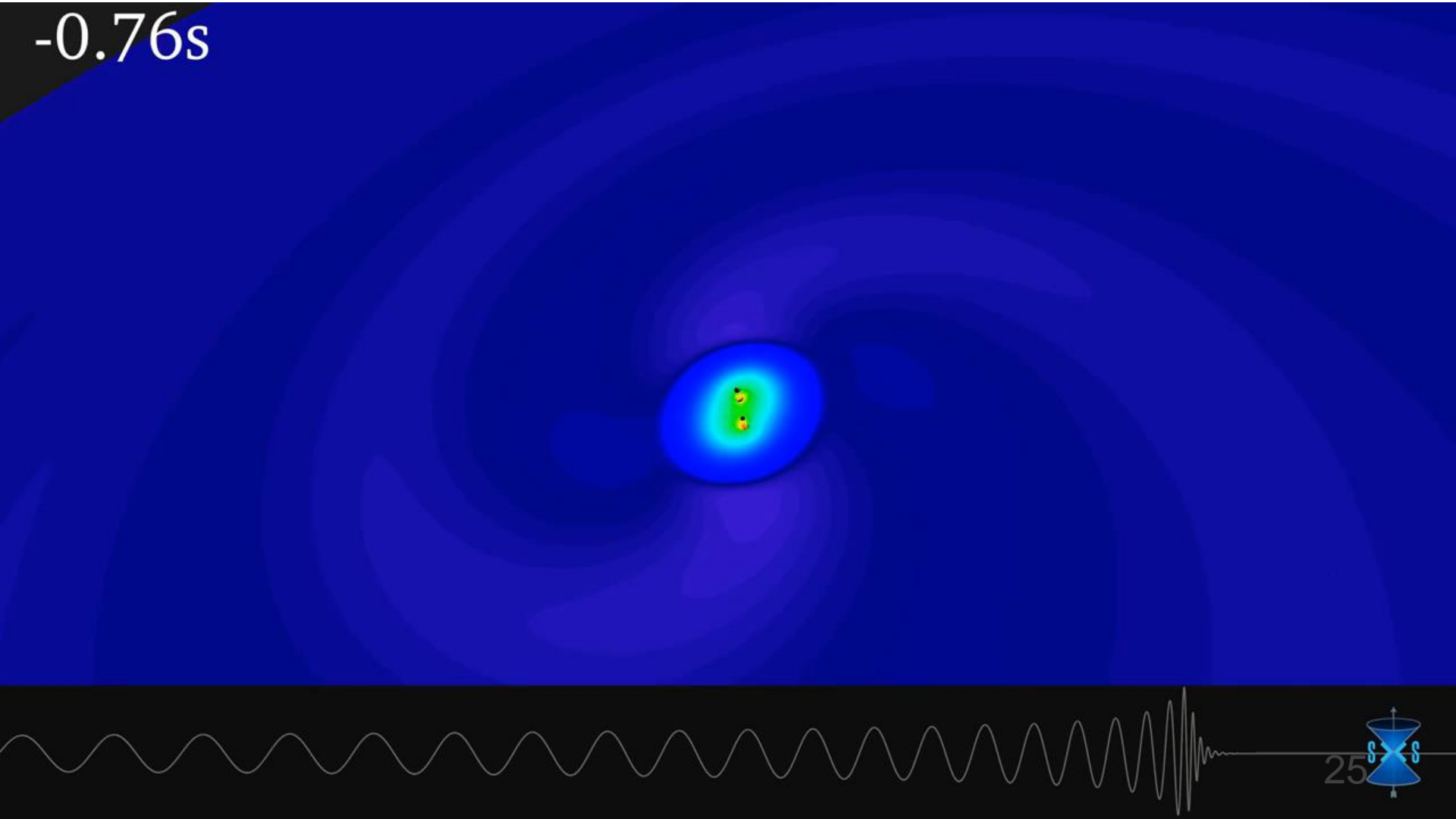
合体 振動



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

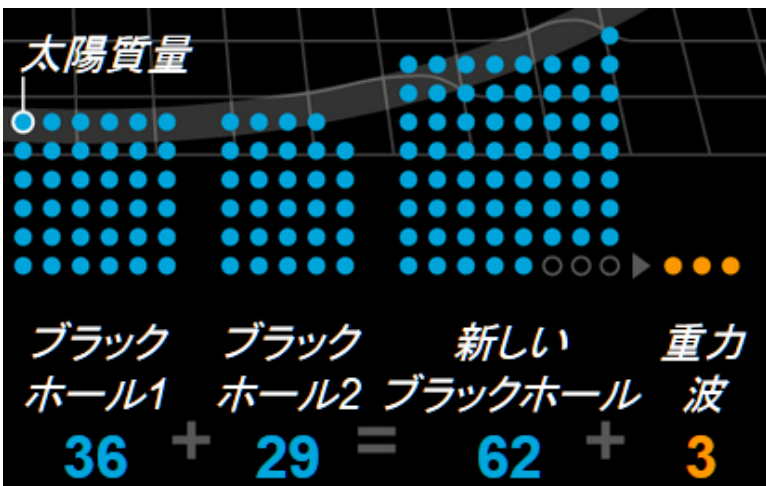


重力波形からわかったこと

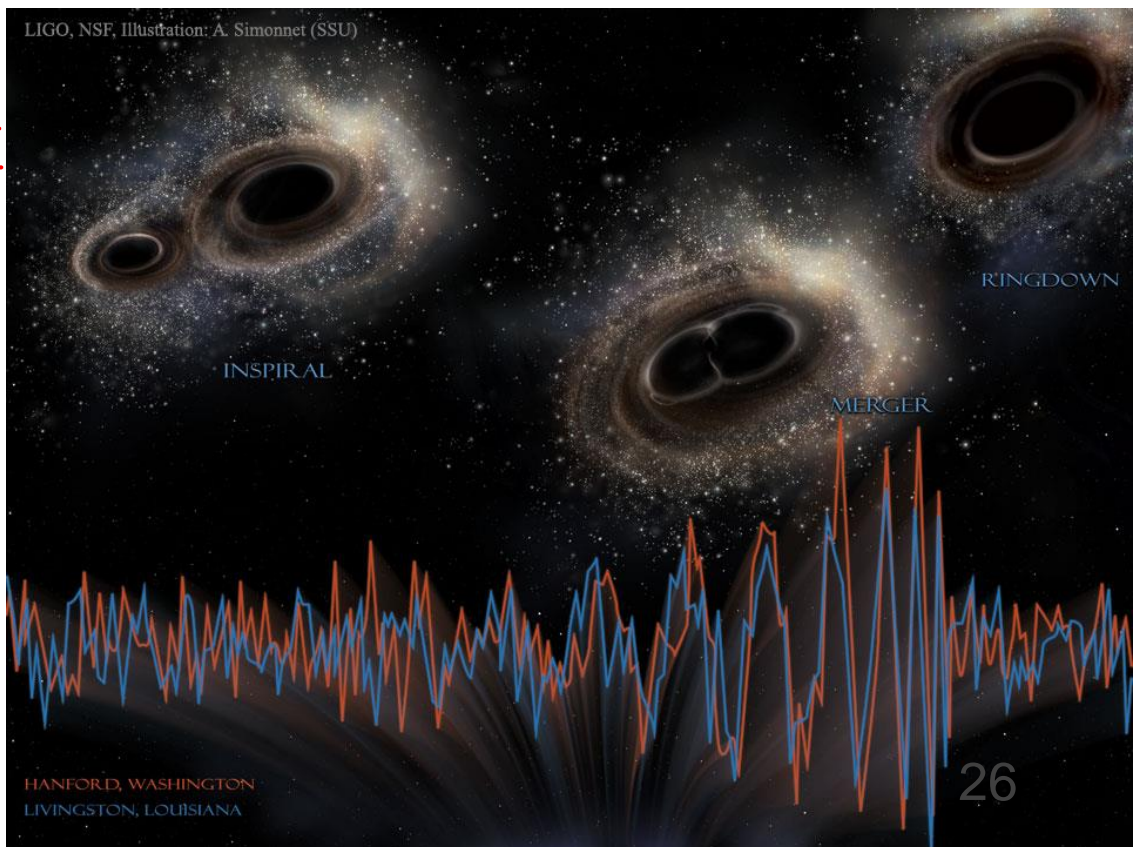
- 太陽質量の**36倍**と**29倍**が合体して **62倍**に(驚き その2)
→ **ブラックホール**と判明 (驚き その3)
- 太陽質量の3倍相当のエネルギーが重力波として放出
- 地球から**13億光年**

エネルギー 質量

$$E = mc^2$$



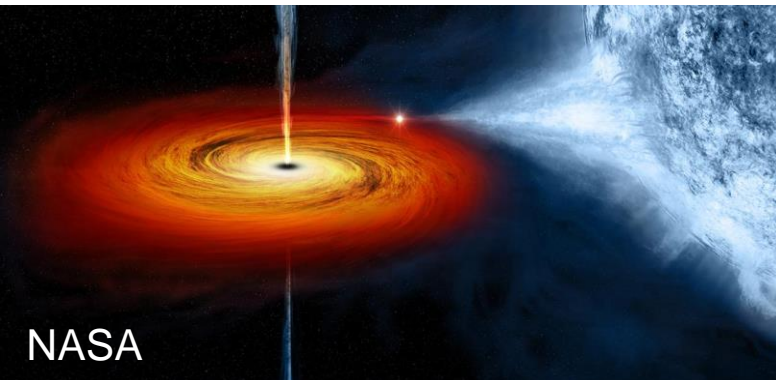
NATIONAL GRAPHIC



ブラックホール質量の謎

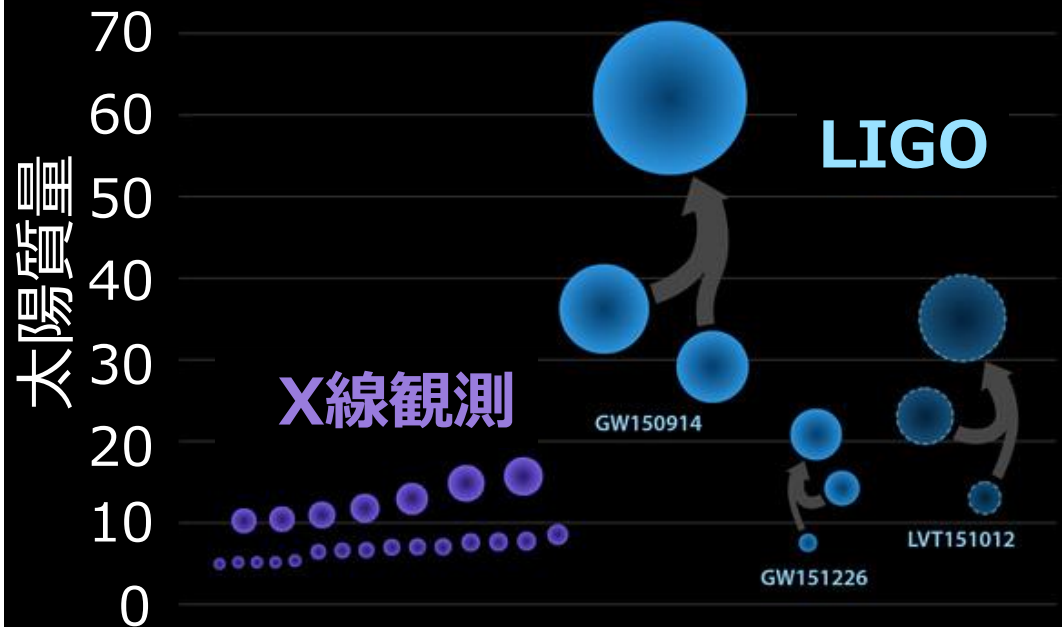
- これまでX線の観測で見つかったブラックホールはせいぜい10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか？

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



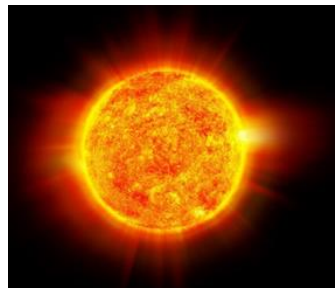
<https://www.ligo.caltech.edu/>

質量がわかっているブラックホール



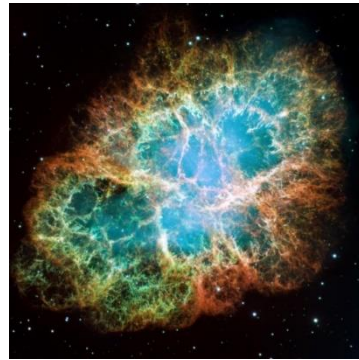
ブラックホールはどうできる？

- 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

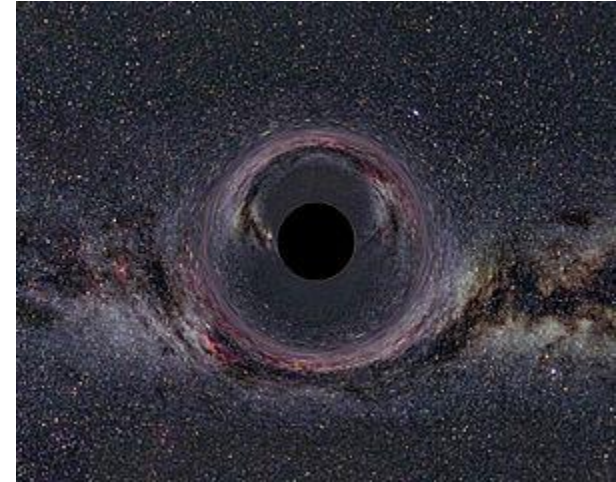


普通の星

歳を取ると



重い
場合

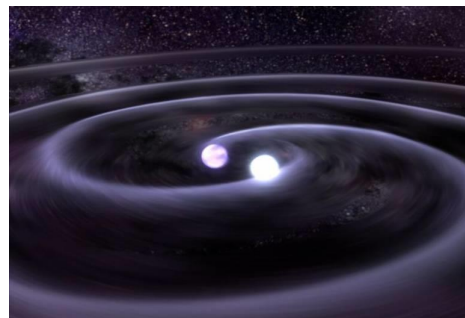


軽い場合

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

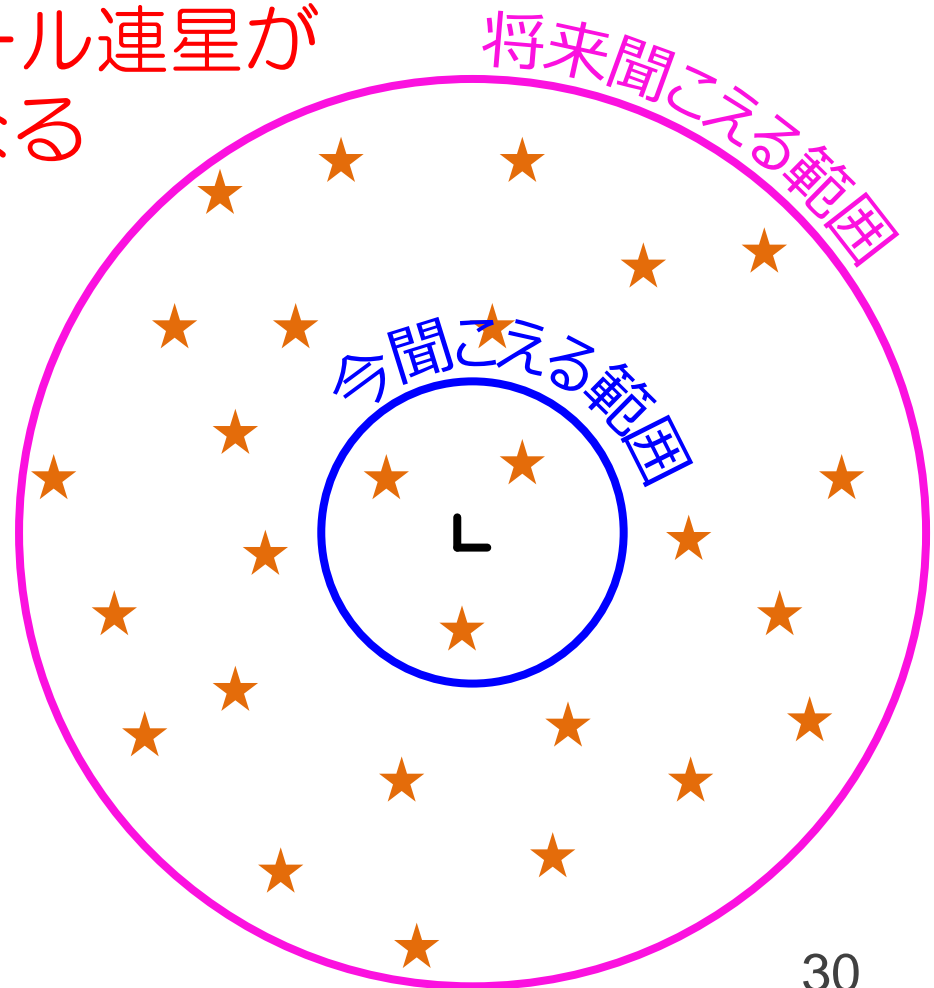
宇宙初期にできた
大きな初代星から？

宇宙初期の
密度ゆらぎから？

球状星団の中でできた？

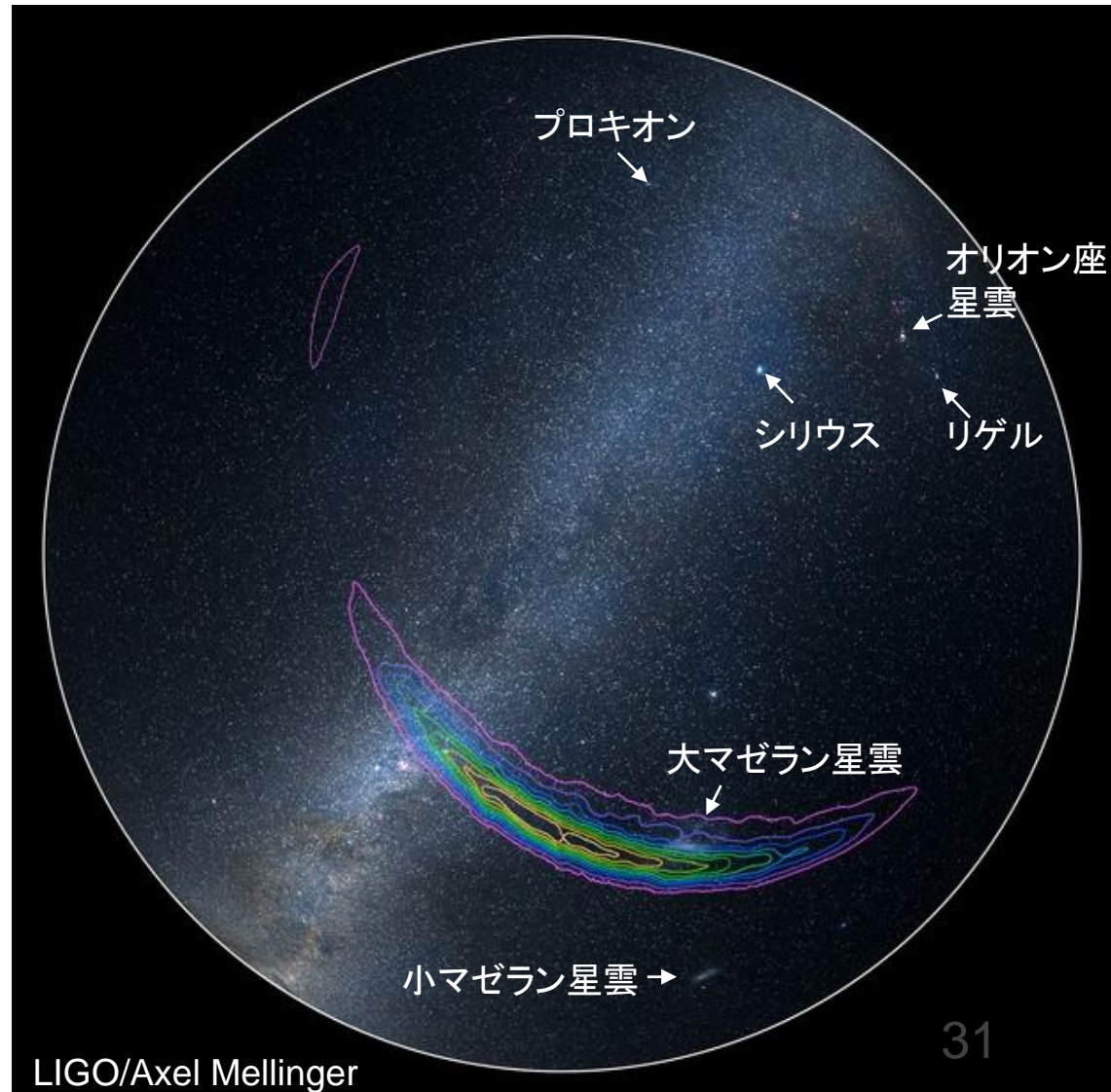
今後の展望

- 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

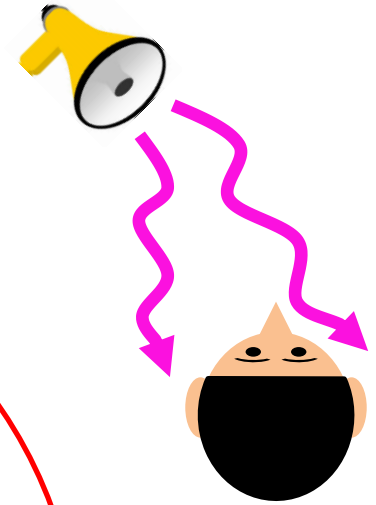
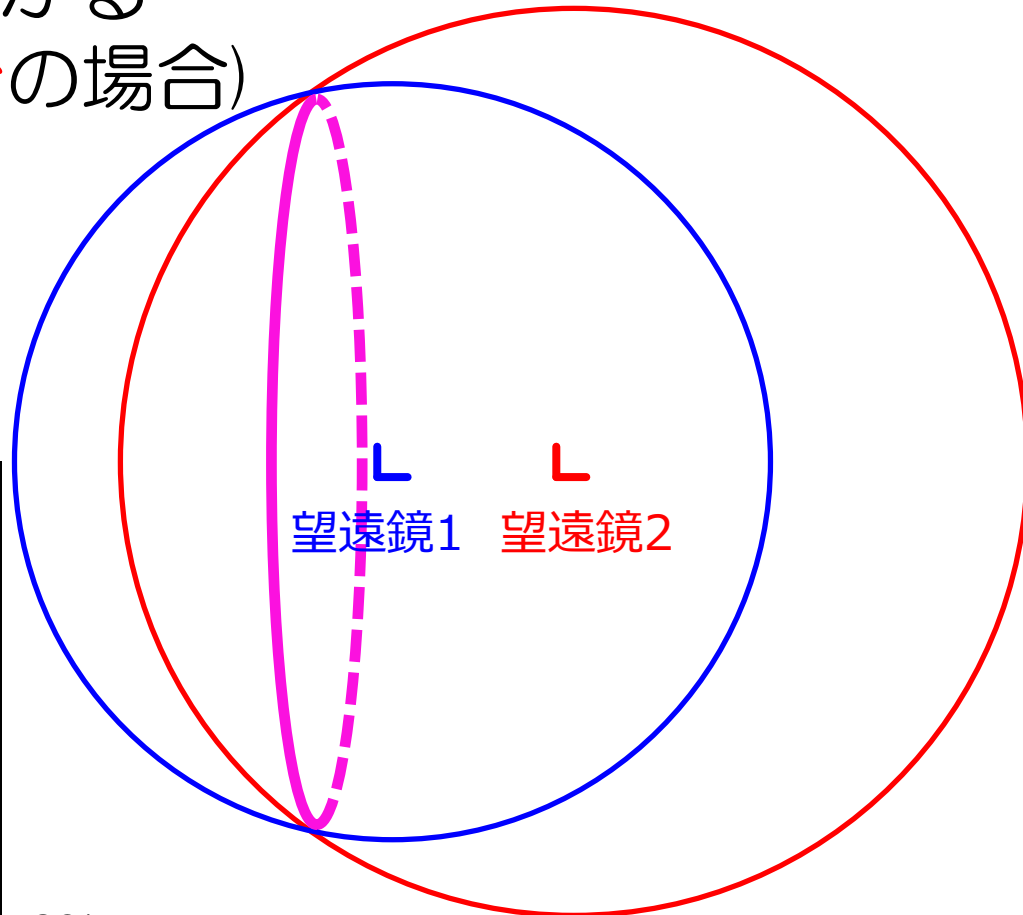


到達時刻にわずかな差が生じる

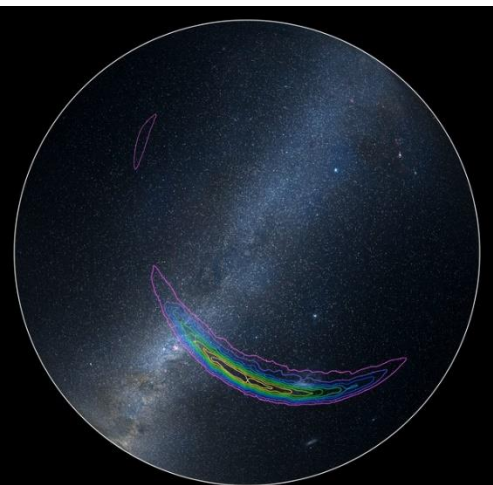
波源の特定方法

- 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

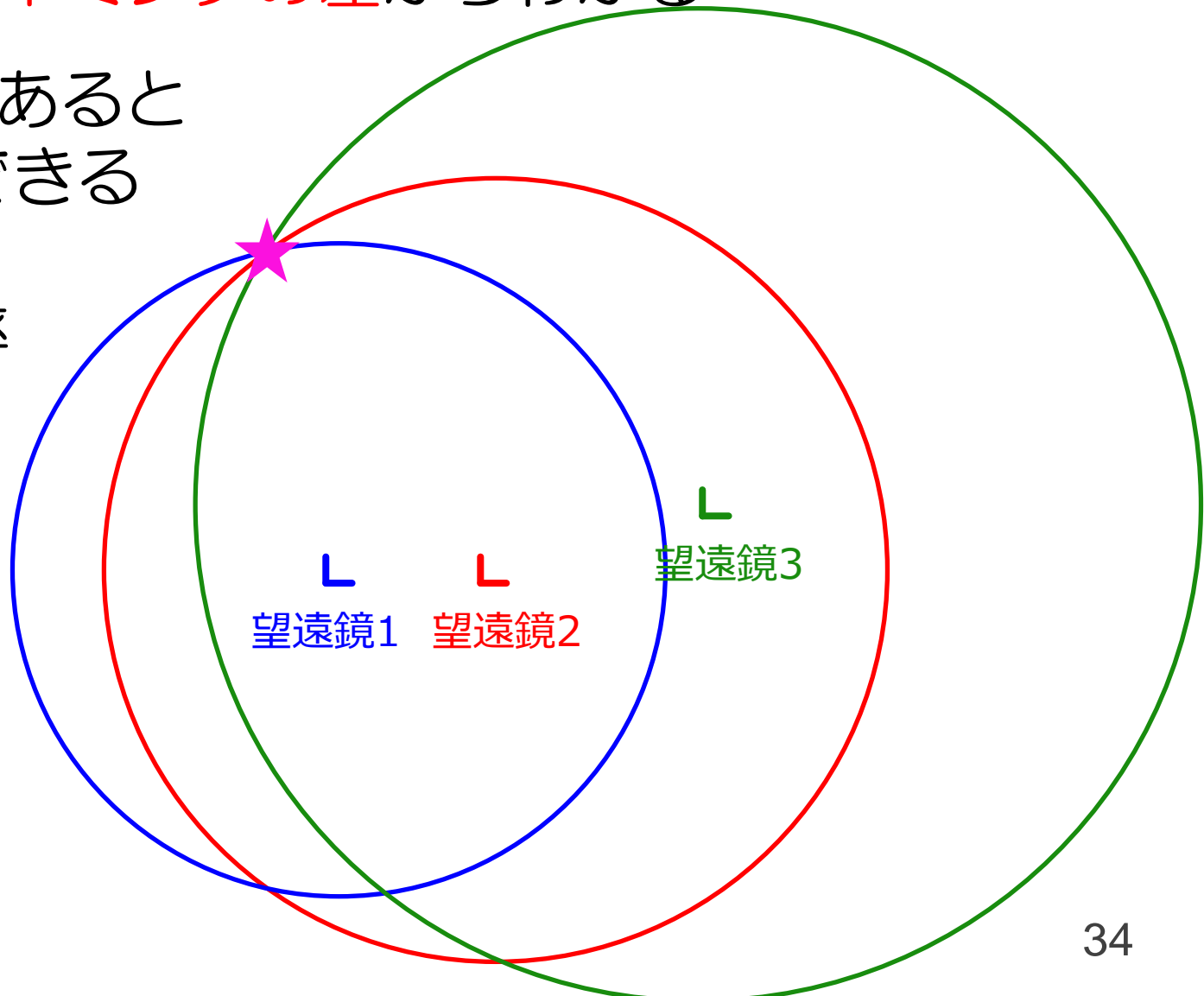


波源の特定方法

- 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

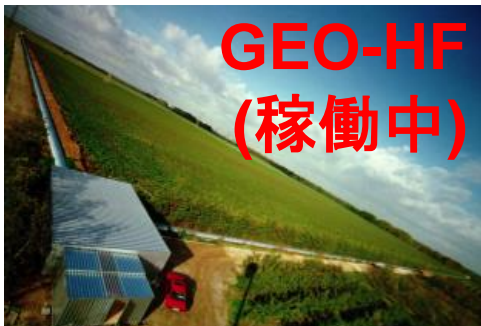
精度や稼働率
を考えると
さらに4台、
5台、と
複数台必要



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

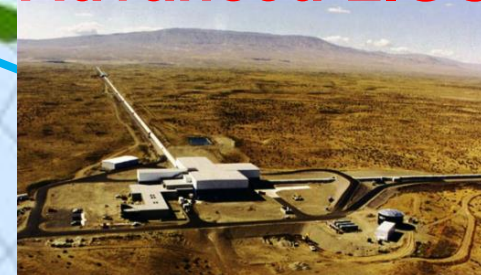
GEO-HF
(稼働中)



Advanced LIGO
(O2へ準備中)



Advanced LIGO



Advanced 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

新潟大学もKAGRAに参加

- 新潟大学 工学部 電気電子工学科
佐藤孝 研究室
鈴木孝昌 研究室
- 新潟大学 工学部 福祉人間工学科
大河正志 研究室
- 新潟大学 理学部 物理学科
宇宙物理学研究室 (大原謙一先生)

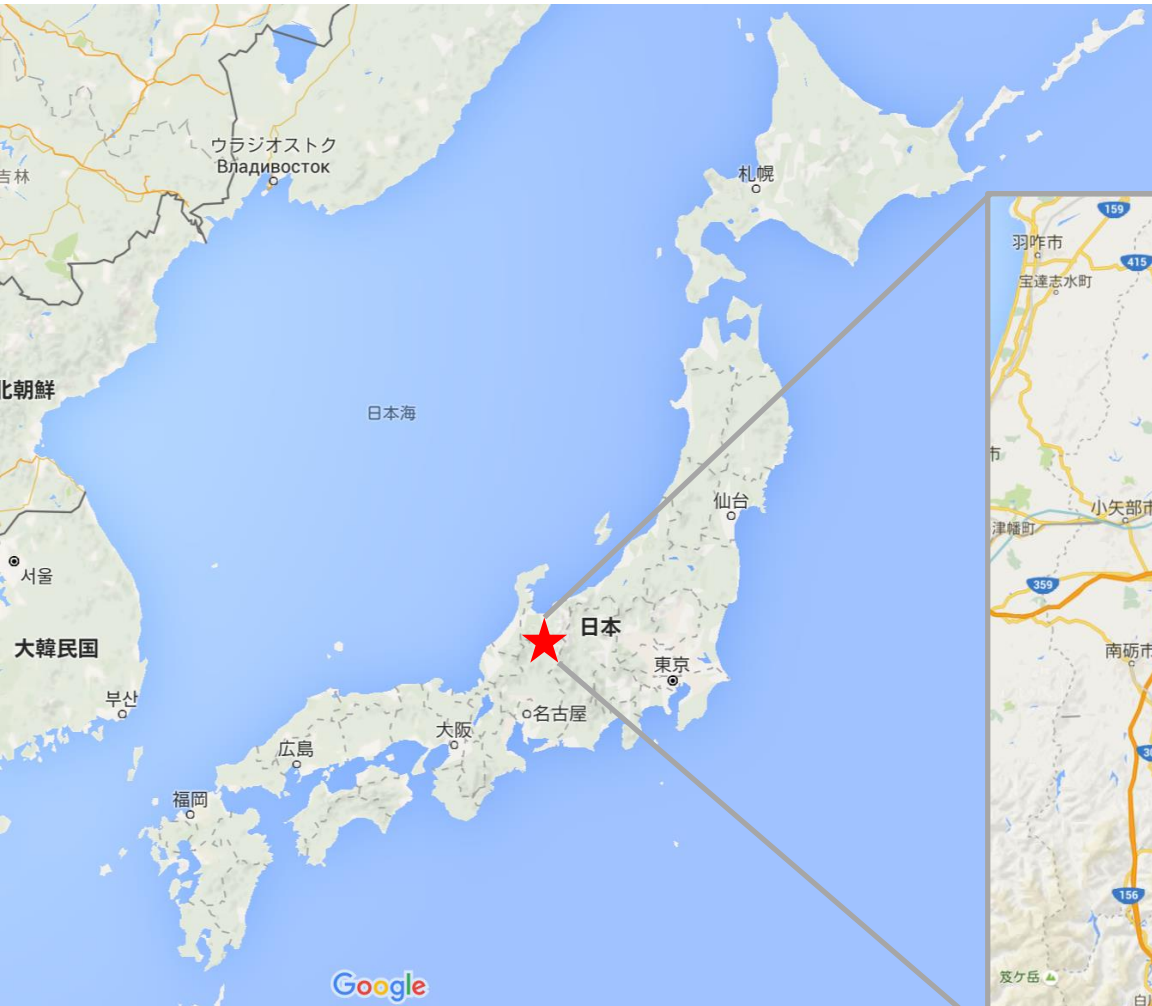


KAGRA建設中

- 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

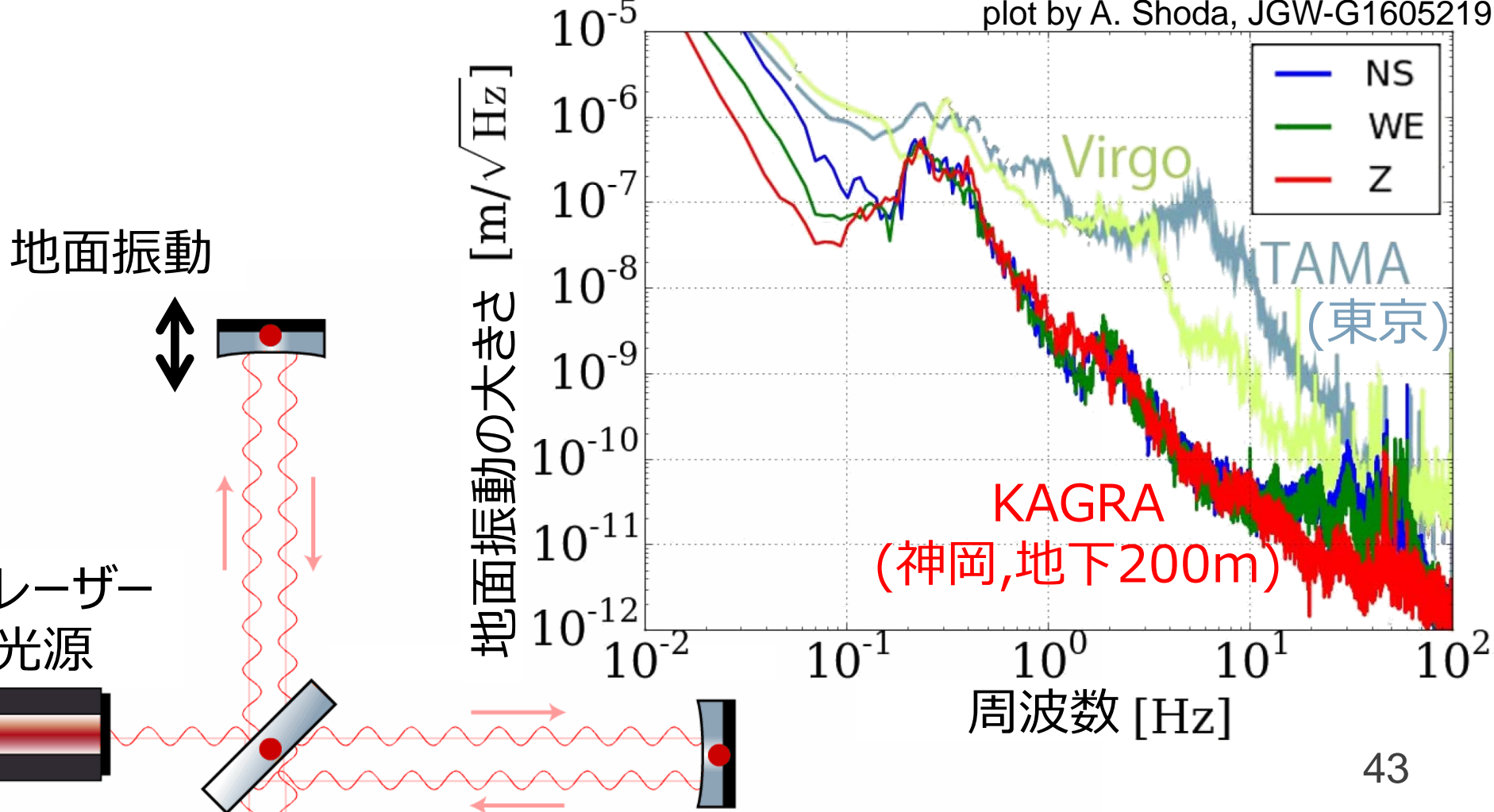
- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



なぜ地下なののか？

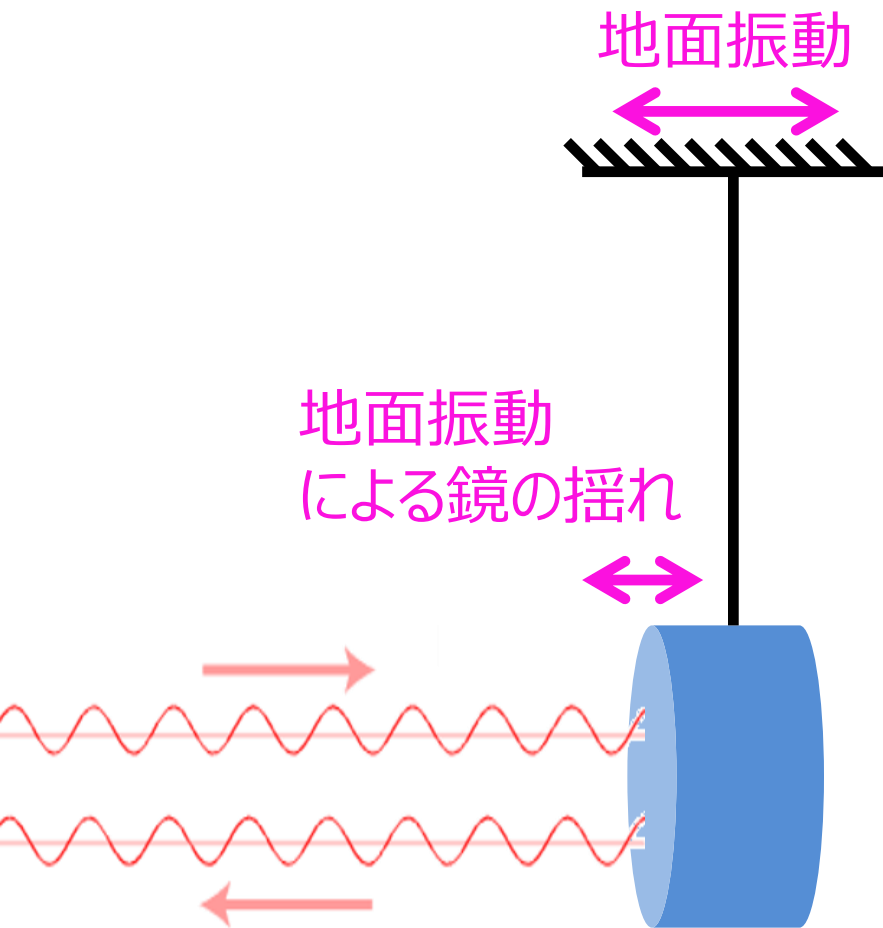
- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



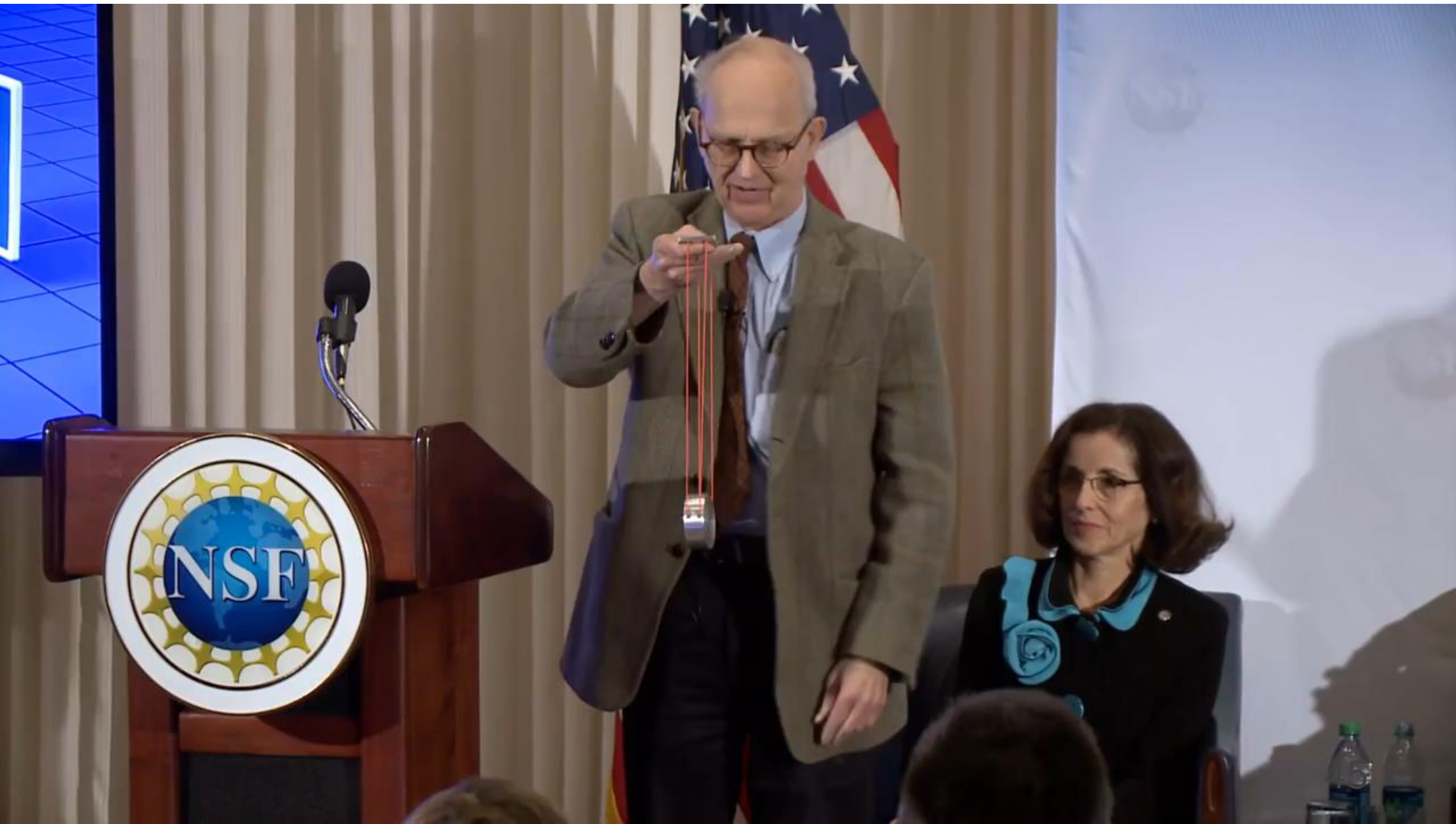
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



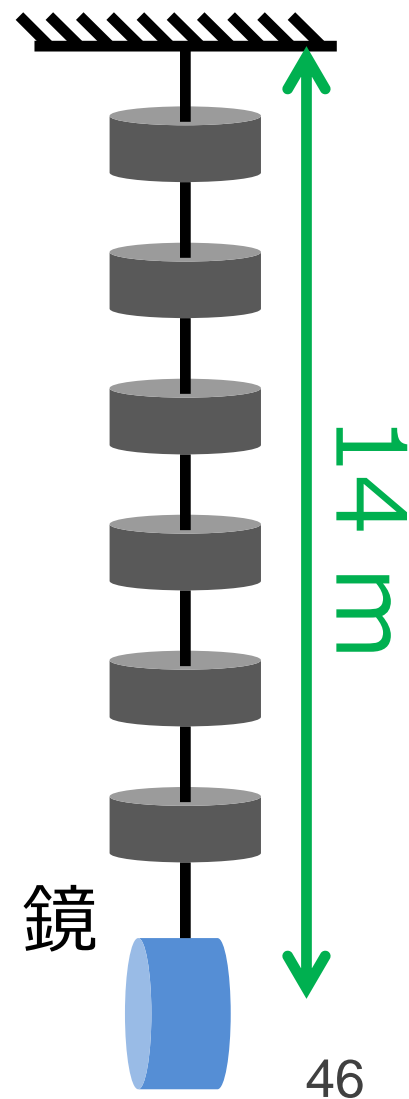
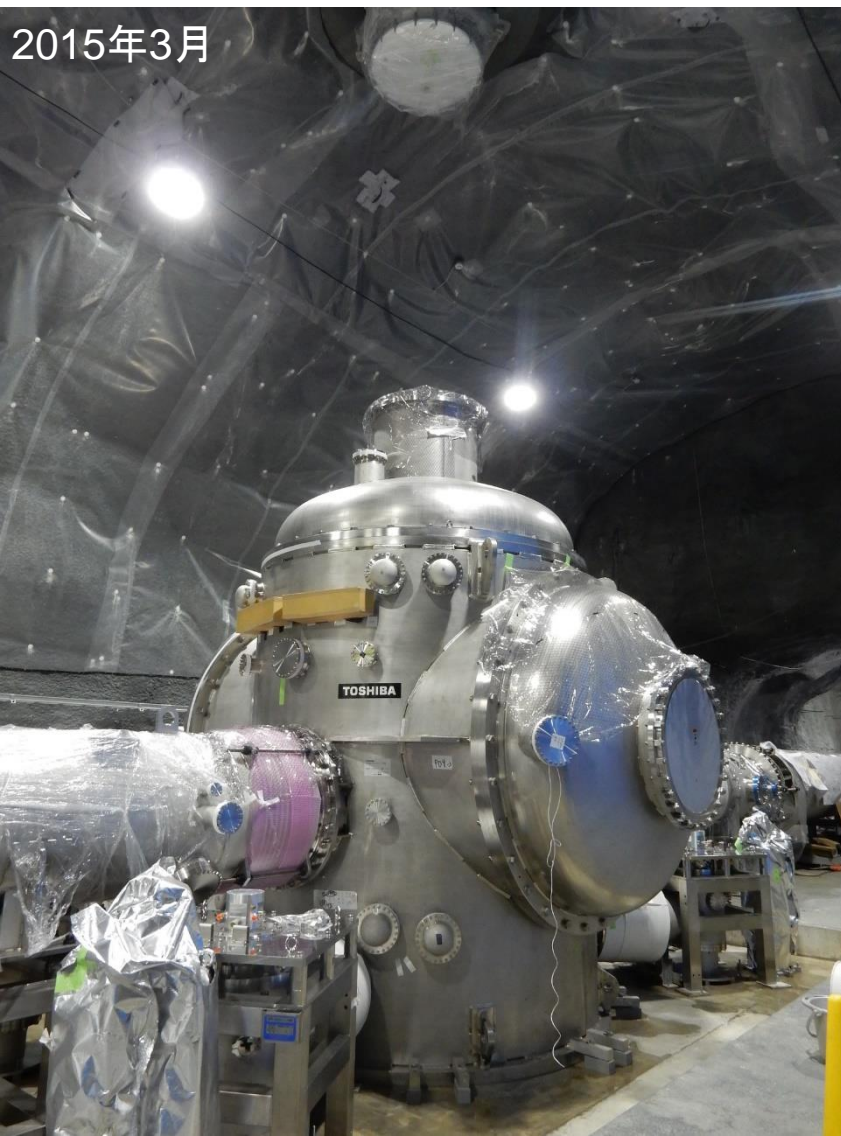
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



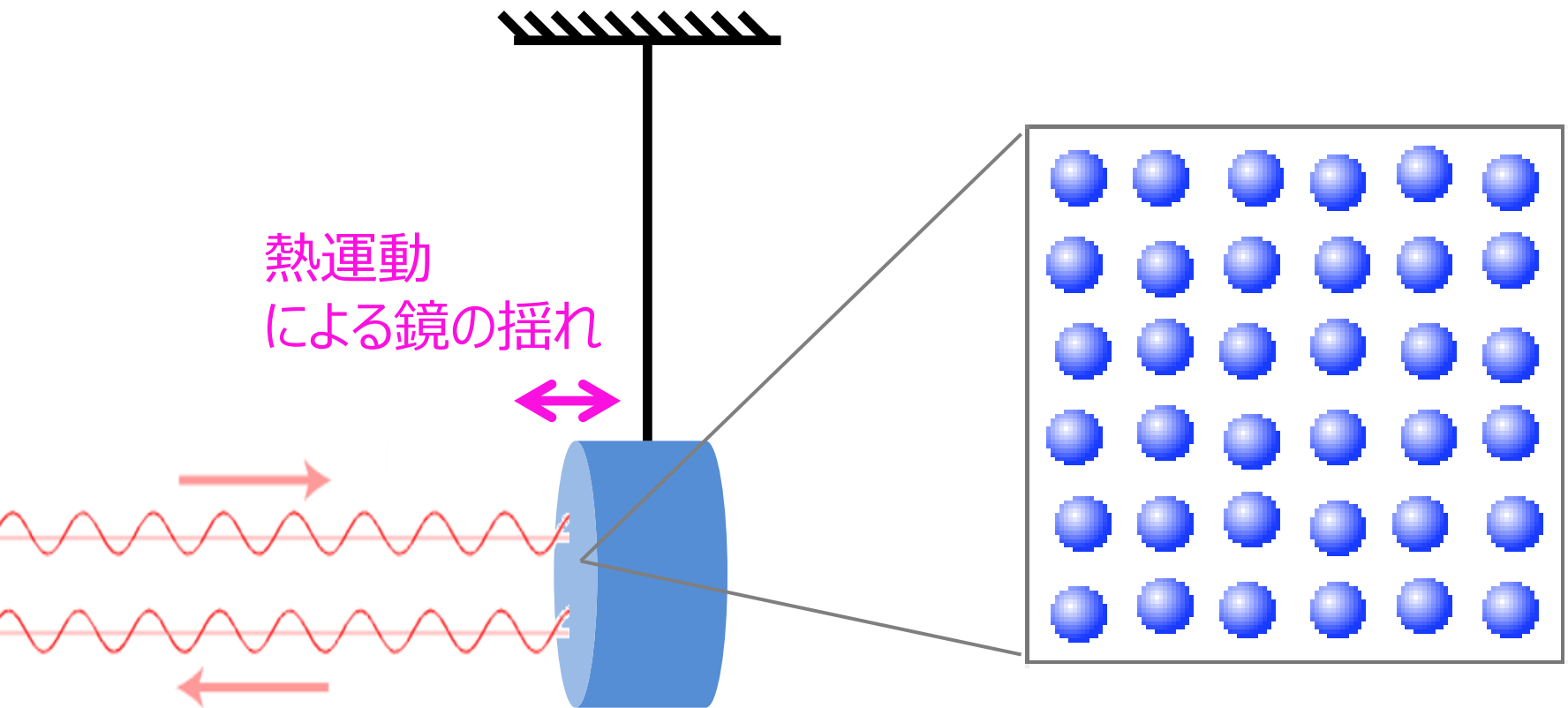
KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振



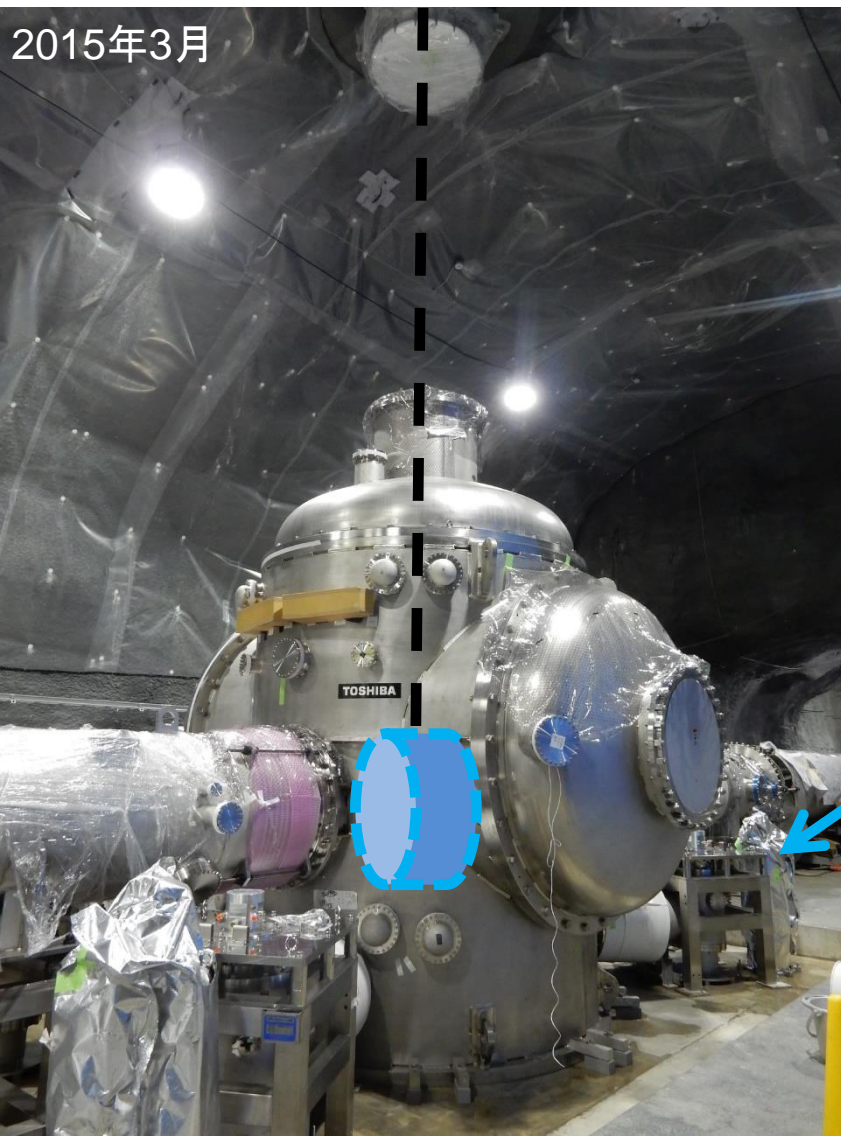
鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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

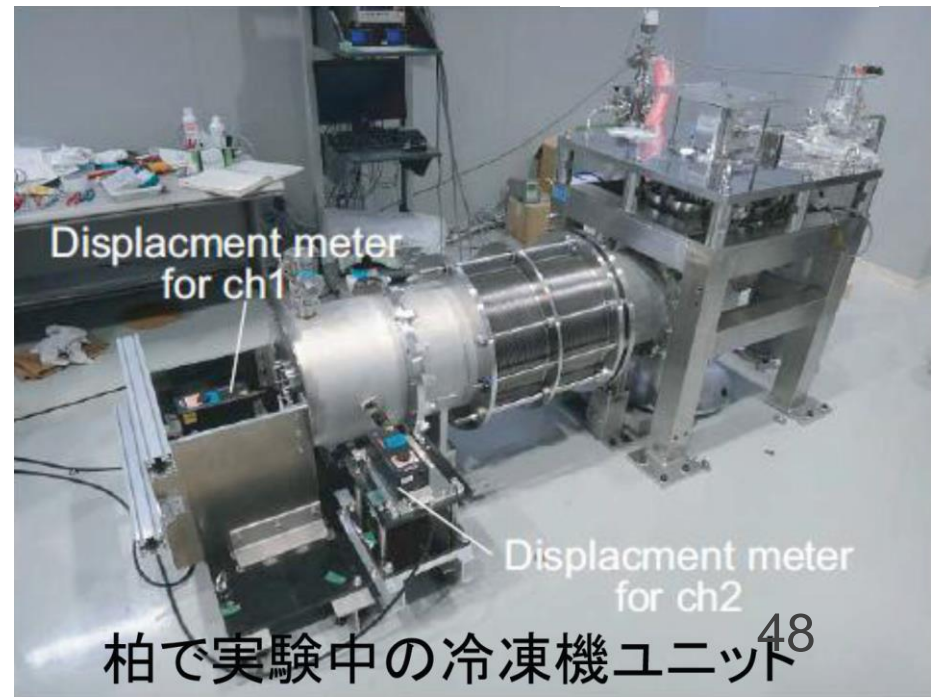


KAGRAの低温装置

- 最低振動の冷凍機を開発



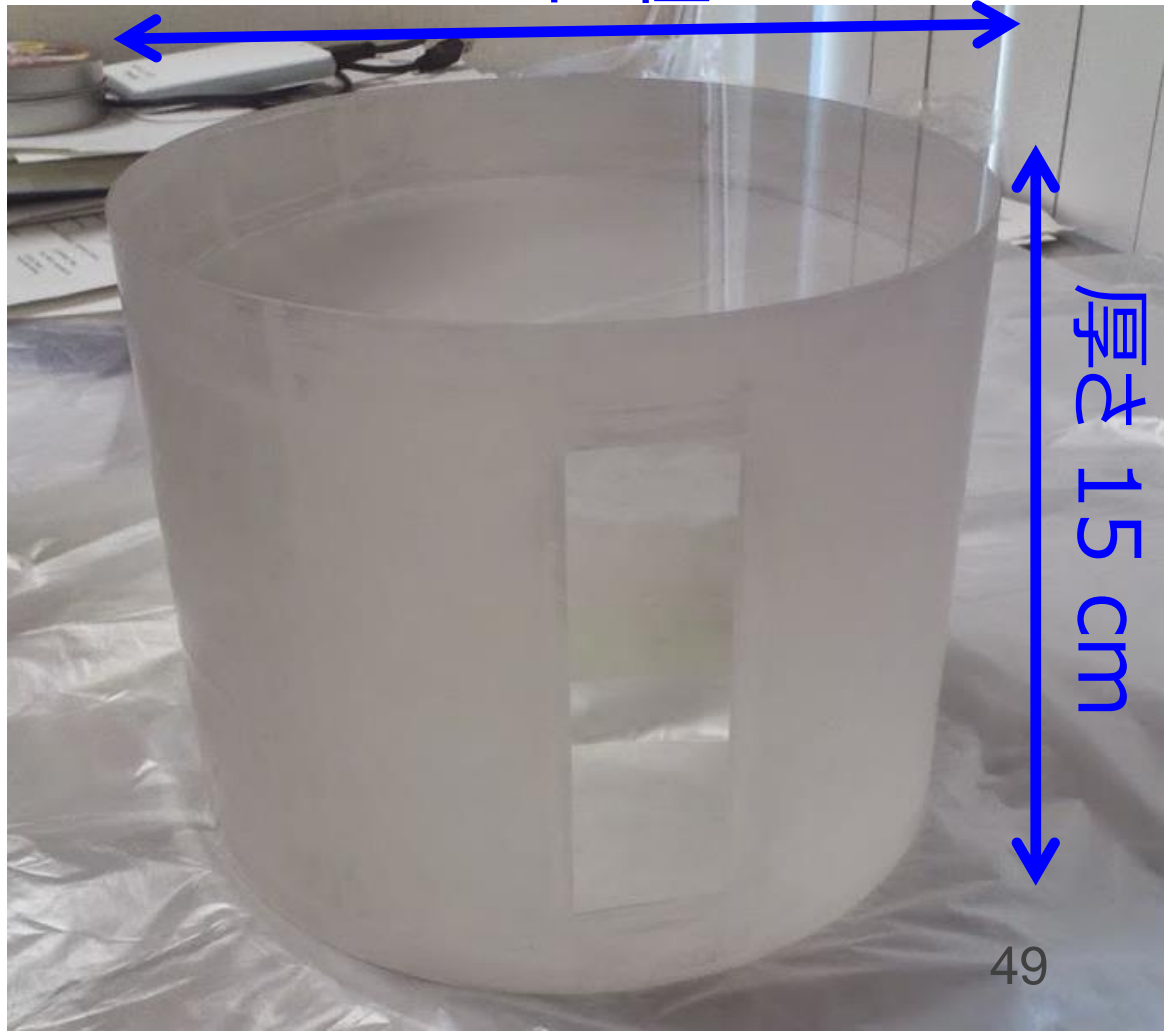
冷凍機



柏で実験中の冷凍機ユニット⁴⁸

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



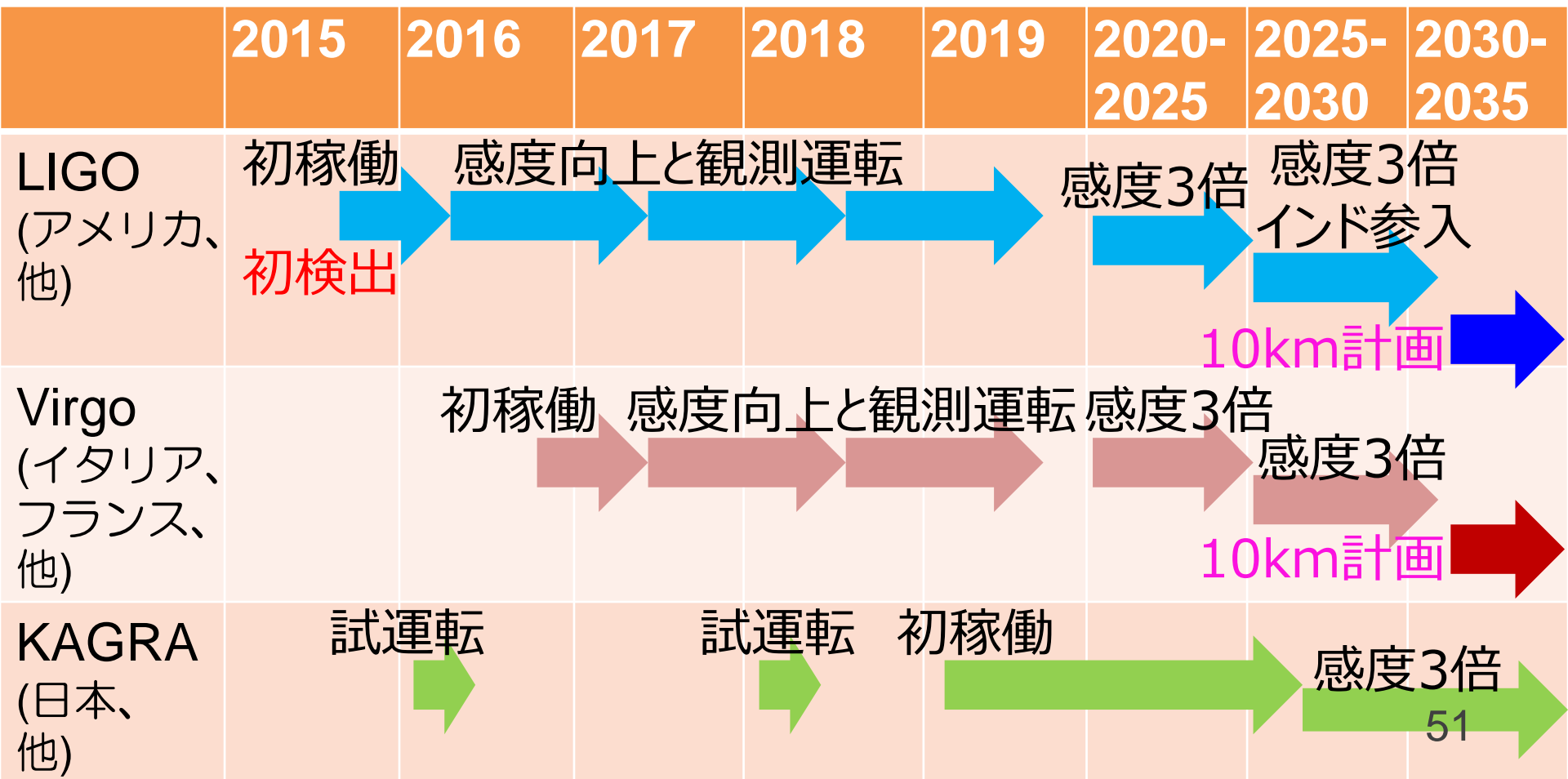
KAGRAの現在の状況

- 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



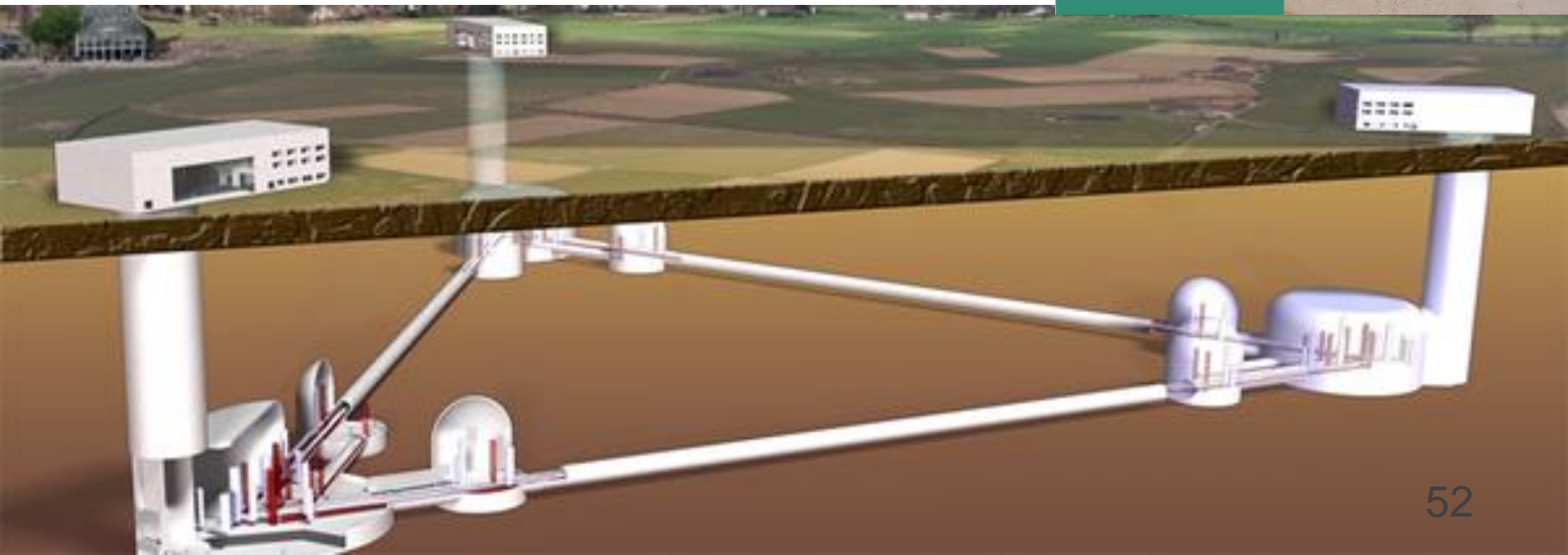
各国の将来計画

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

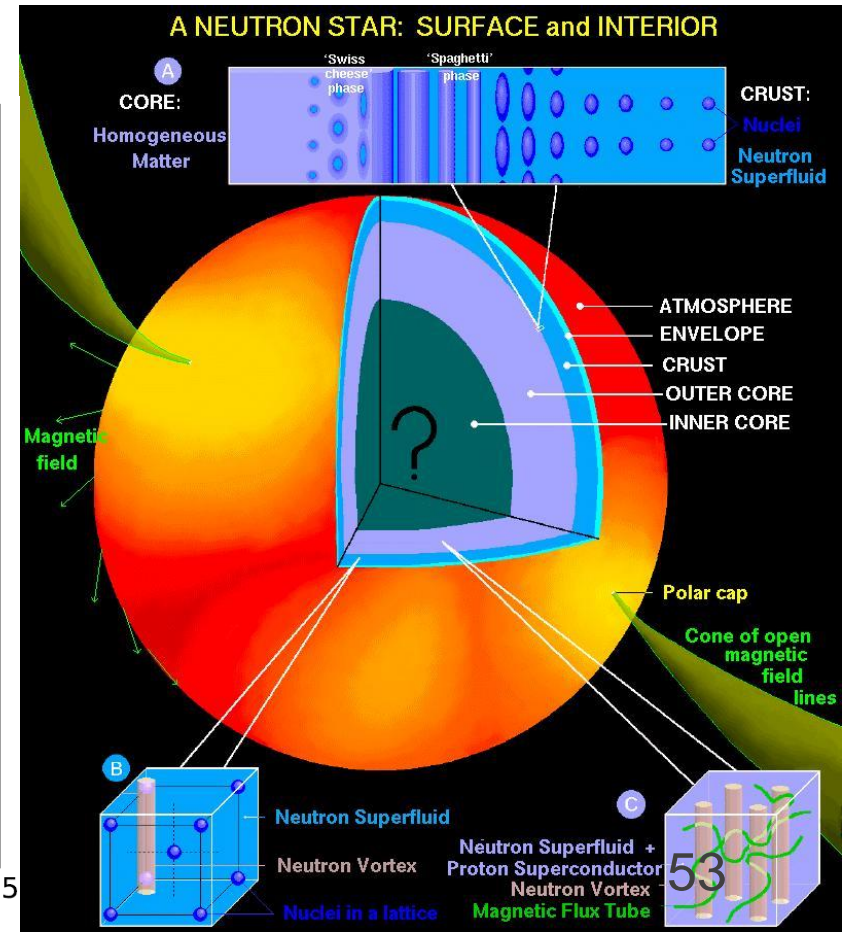
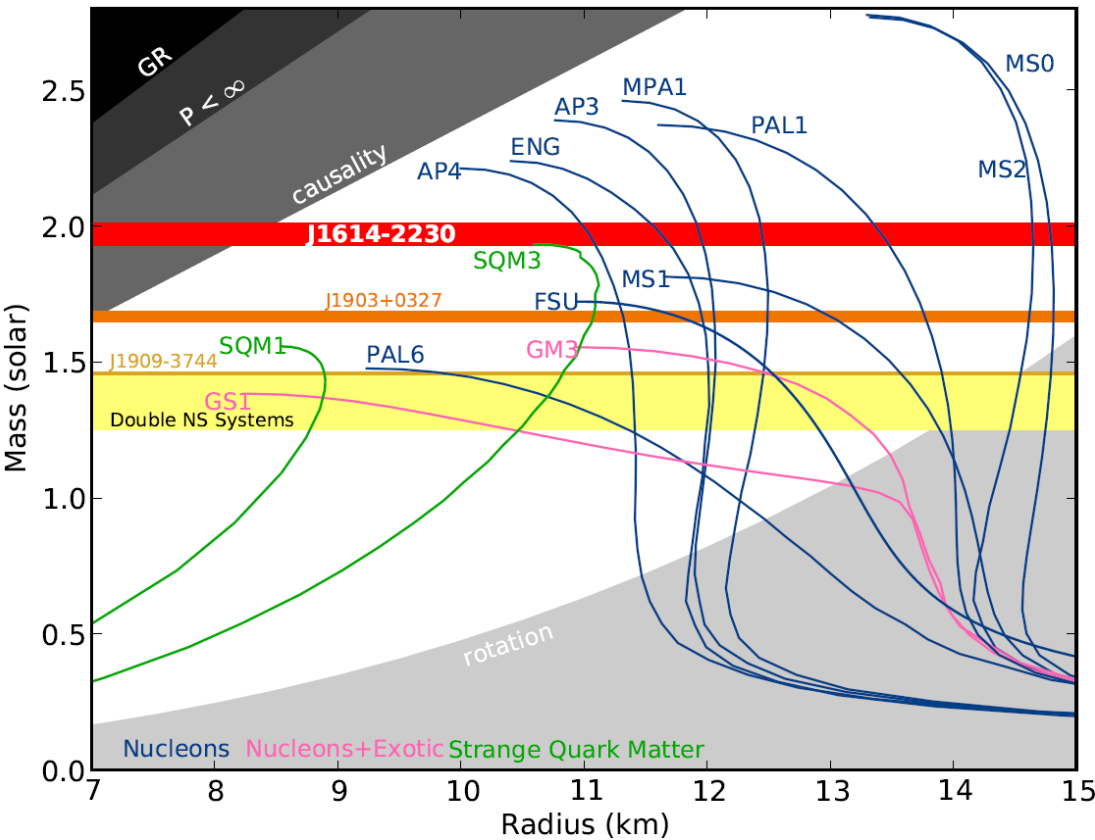
- 将来の10km計画
 アインシュタイン望遠鏡計画 (ヨーロッパ)
 地下建設と低温
- KAGRAは将来計画の技術を
 先取りしている



中性子星連星合体

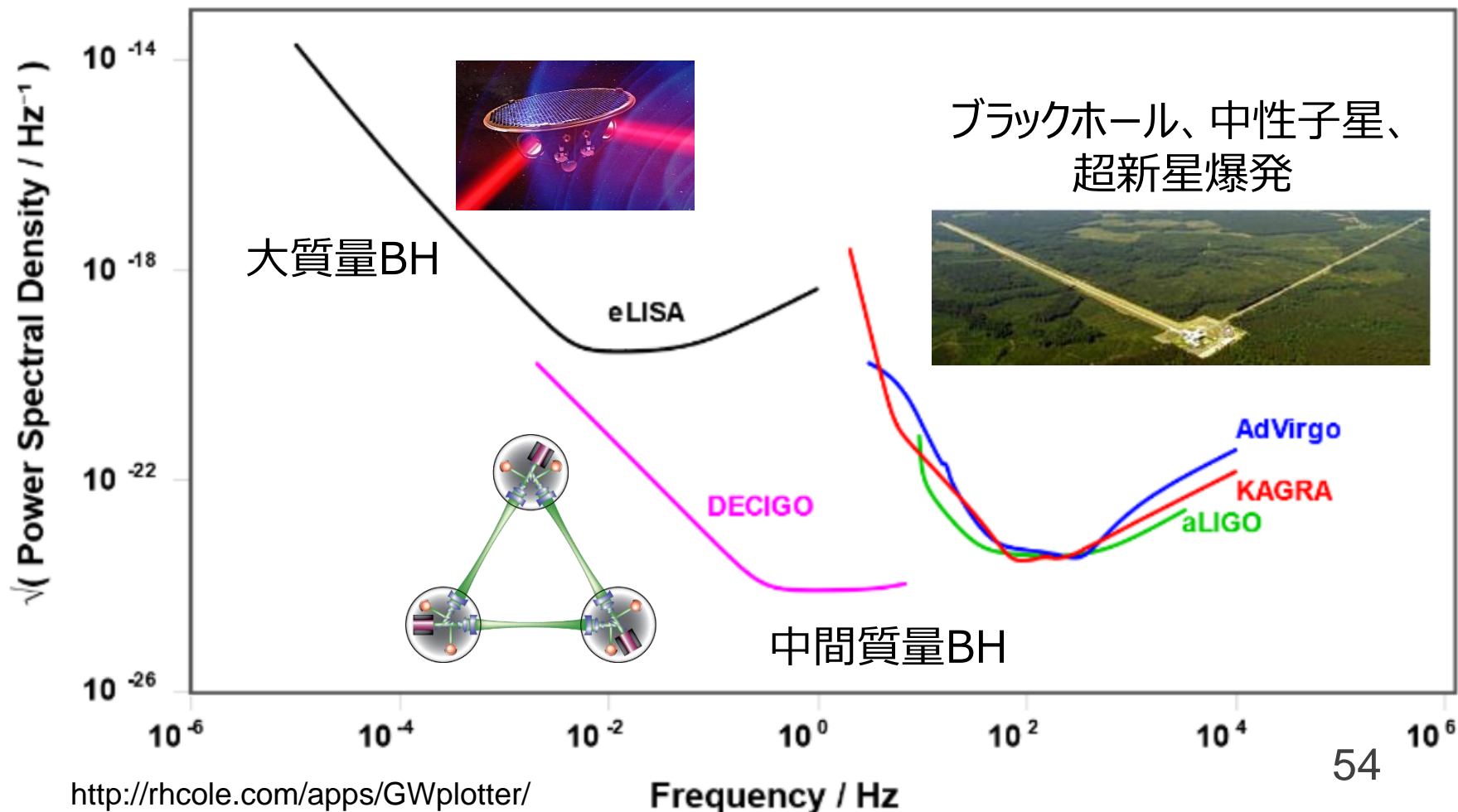
- 太陽質量程度で半径10 km
- 中身がどうなっているのかわかっていない
- 状態方程式の決定

Nature 467, 1081 (2010)



さらに将来: 宇宙重力波望遠鏡

- 地面振動がない、基線長を長くできる
- ヨーロッパのeLISA計画、日本のDECIGO計画

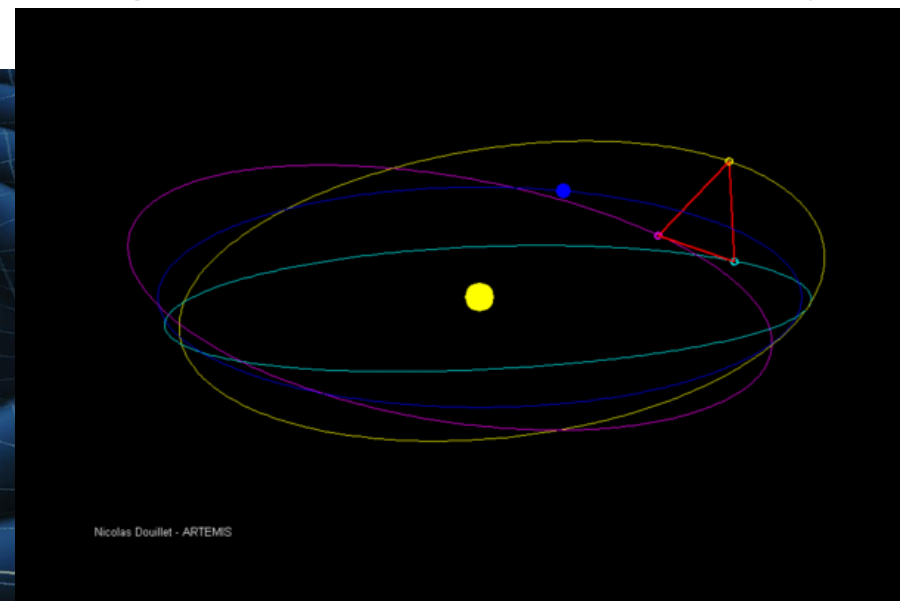
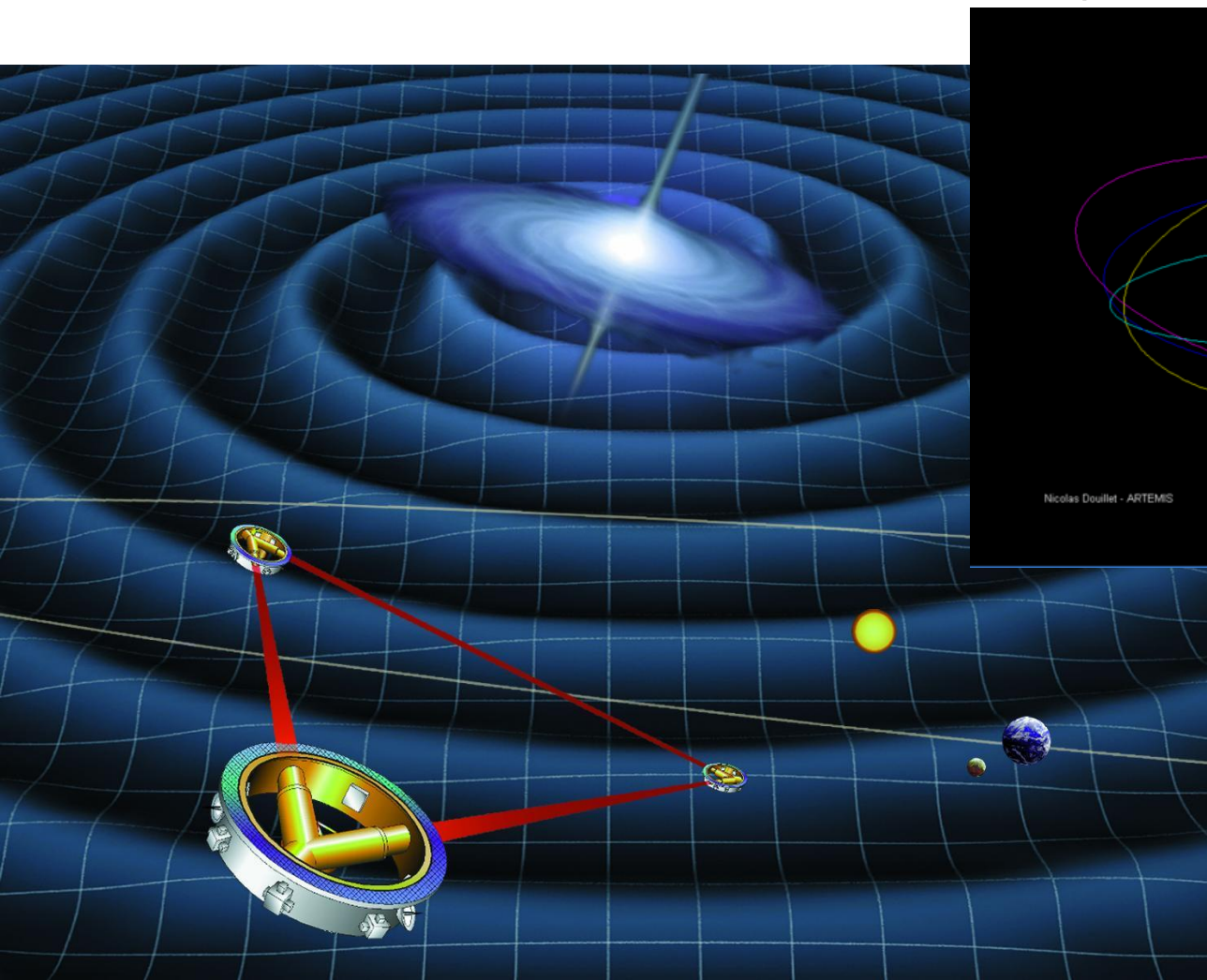


eLISA計画



European Space Agency

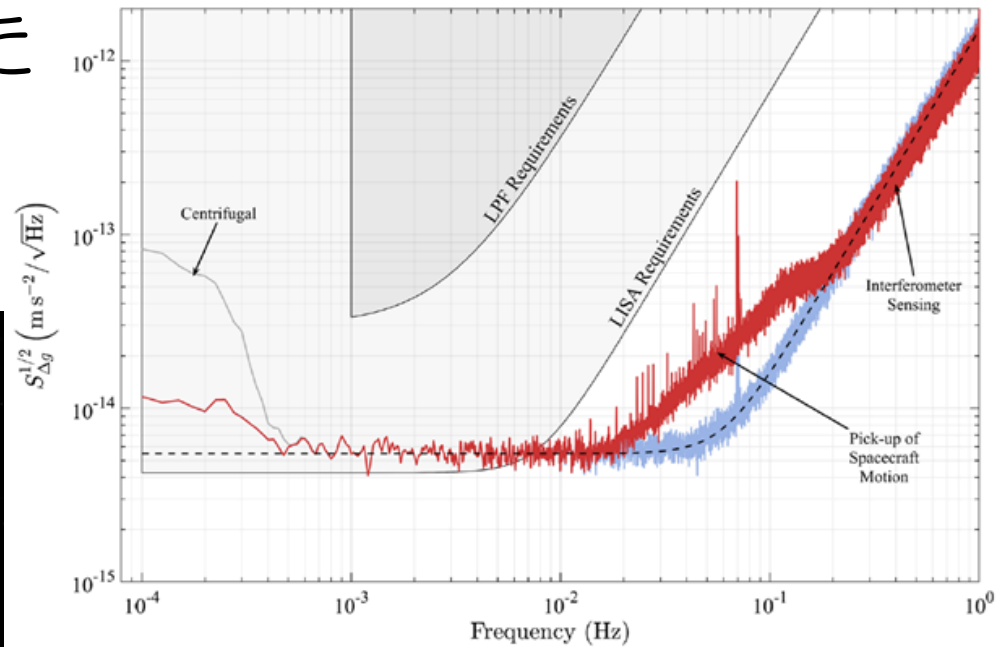
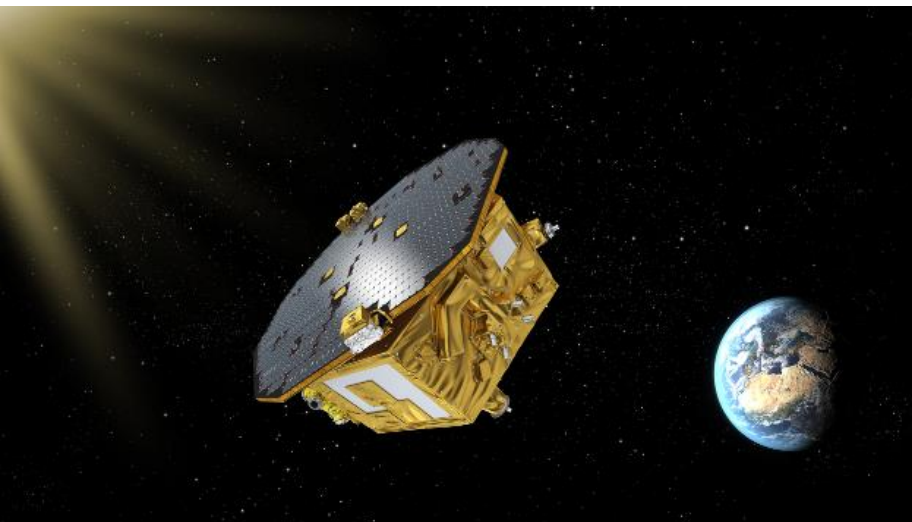
- Evolved Laser Interferometer Space Antenna
元々はNASAとESAの合同(2011年にNASA撤退)



基線長
500万 km
→ 100万 km?
2034年打ち上げ?

2016年のもう1つの重大ニュース

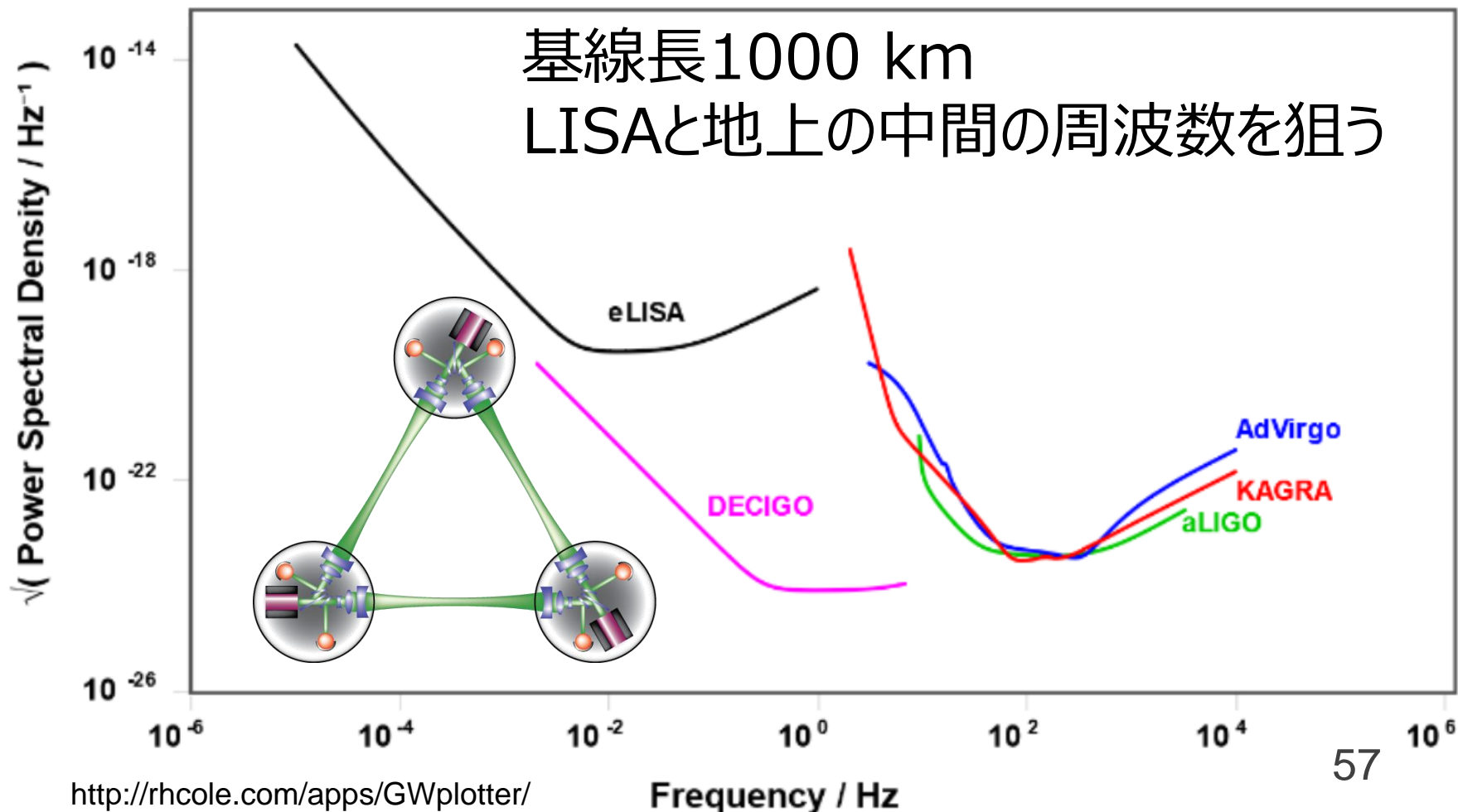
- LISA Pathfinderの**成功**
宇宙重力波望遠鏡LISAの技術実証機
- 2016年6月7日に最初の結果が公開された
- 加速度雑音と変位雑音が
LISAの要求を満たした
→ LISAへ大きな
一歩



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

DECIGO計画

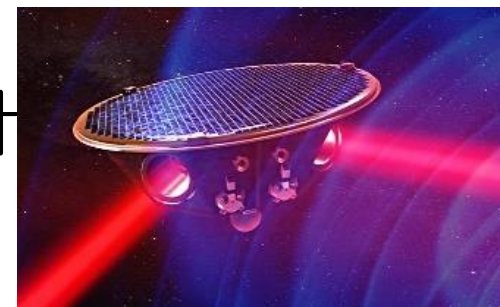
- Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (decide and go)



LISAとの違い

- eLISA

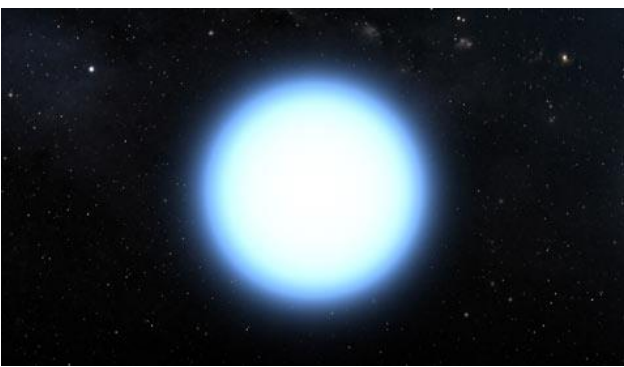
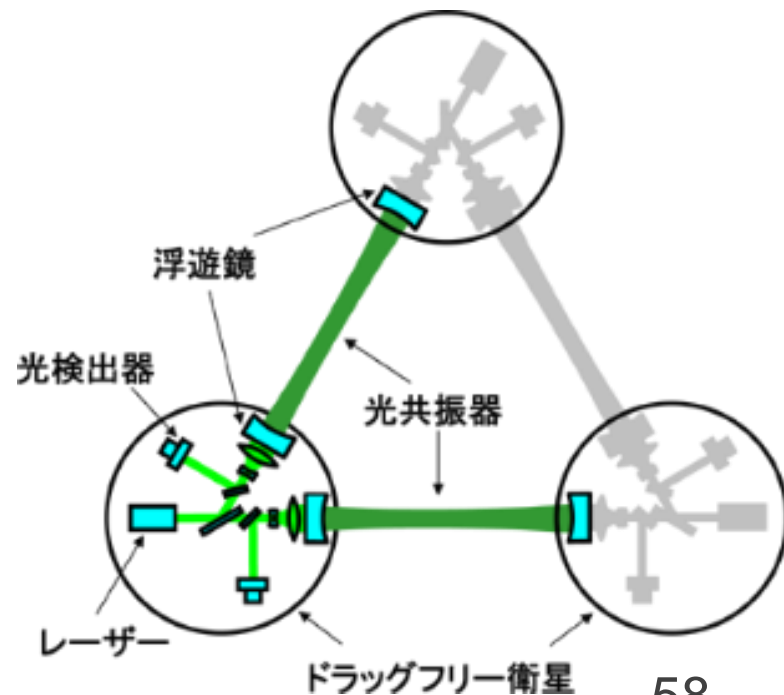
基線長500万 km、Michelson干渉計
大質量ブラックホール



- DECIGO

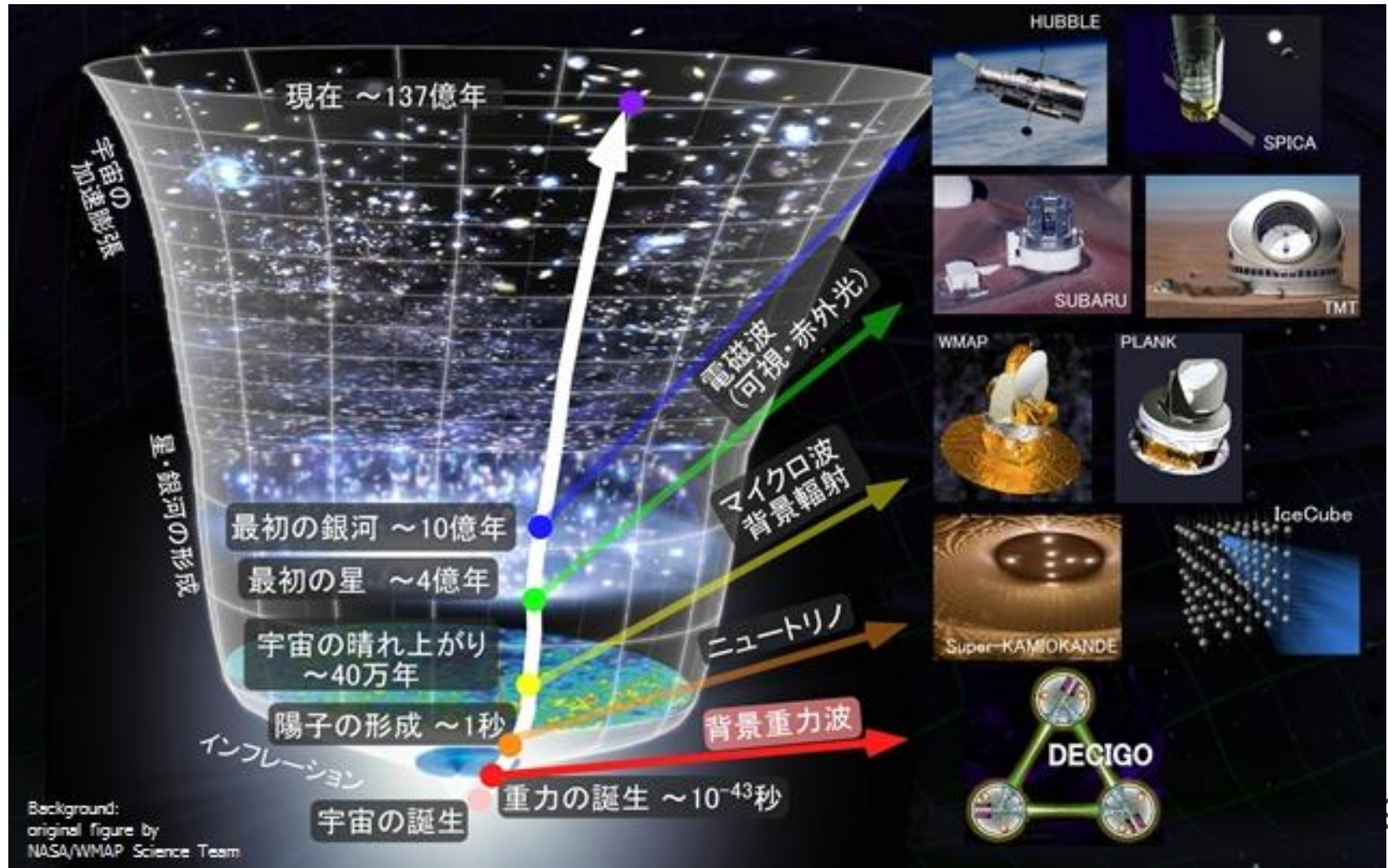
基線長1000 km、Fabry-Pérot干渉計
中間質量ブラックホール
原始重力波

白色矮星連星などの
前景重力波雑音がない



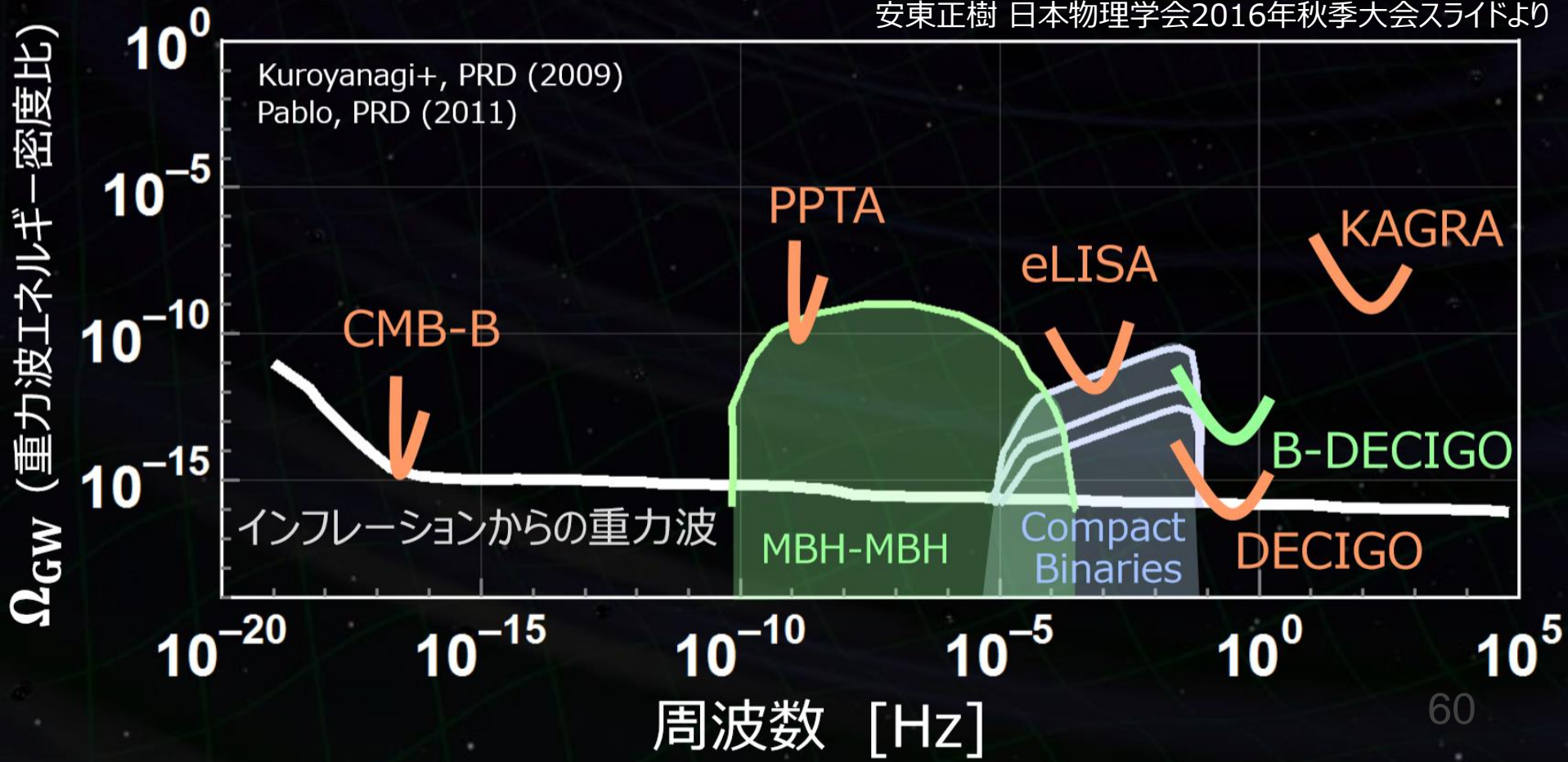
原始重力波

- 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



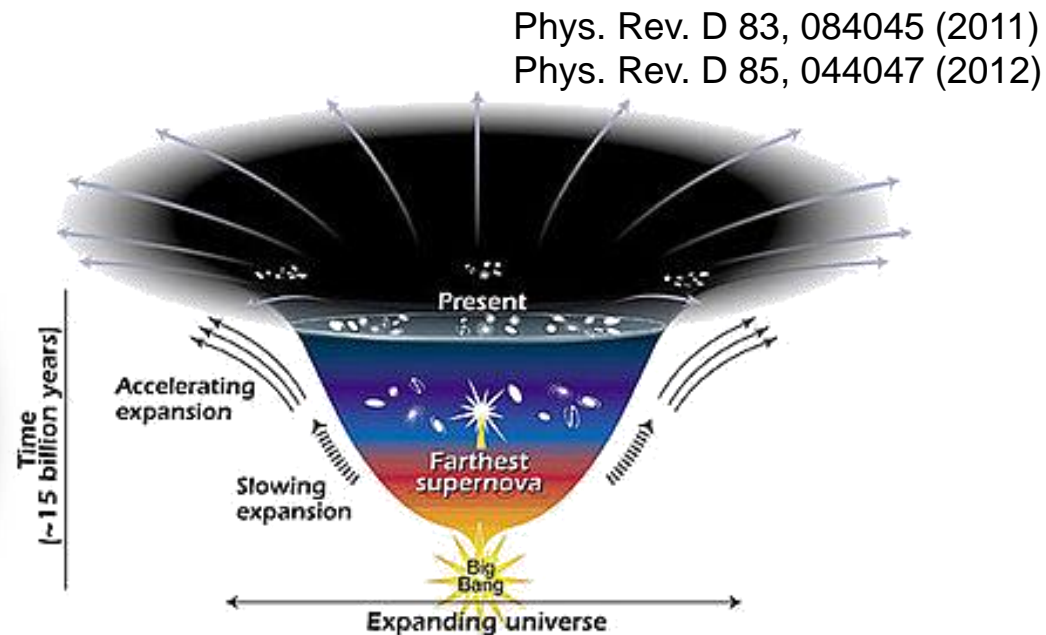
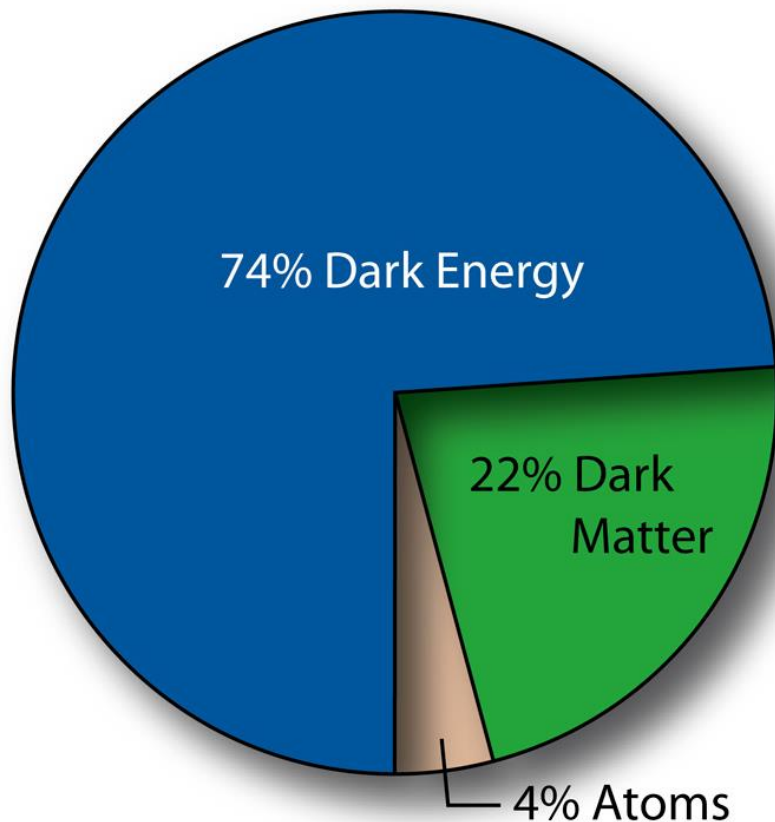
DECIGOによる原始重力波観測

- DECIGOは原始重力波の観測に適している
- スペクトルの形から宇宙の歴史がわかる



重力波による宇宙膨張の観測

- 中性子星連星からの重力波で距離がわかる
- 母銀河がわかれば赤方偏移がわかる(電磁波観測)
→ **宇宙加速膨張**が確認できる
(重力波の位相を詳しく調べれば電磁波観測も不要)



This diagram reveals changes in the rate of expansion since the universe's birth 15 billion years ago. The more shallow the curve, the faster the rate of expansion. The curve changes noticeably about 7.5 billion years ago, when objects in the universe began flying apart at a faster rate. Astronomers theorize that the faster expansion rate is due to a mysterious, dark force that is pushing galaxies apart.

まとめ

- ついに**重力波初検出**、重力波天文学の夜が明けた
- わからなかったこと
 - **30太陽質量**ものブラックホールの起源
 - 重力波の到来方向
 - さらなる検出、**国際観測ネットワーク**の必要
- 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**で雑音を下げる独自の工夫
- 将来計画
 - 地上望遠鏡の**大型化**、地下/低温
 - 宇宙望遠鏡eLISA、DECIGO
 - LISA Pathfinderの**成功**
- 重力波天文学の未来は明るい
 - ブラックホールの起源、中性子星の状態方程式、インフレーション、宇宙加速膨張..... の謎に迫る

参考文献



最後のレポート

- 講義の感想を書いてください
- 内容や難易度などについて改善点があればぜひ
- 名前と学籍番号、実施日を必ず書くこと！

重力波天文学の
夜明けが来たぜよ！



イラスト：
Sora