

学術フロンティア講義「ノーベル物理学賞と地球の未来」 2025年4月18日
@東京大学 駒場キャンパス

2020年ブラックホール、2017年重力波

重力波による ブラックホール研究

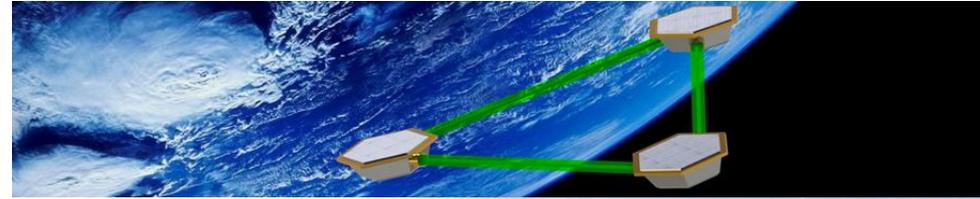
道村唯太

東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター
michimura@resceu.s.u-tokyo.ac.jp



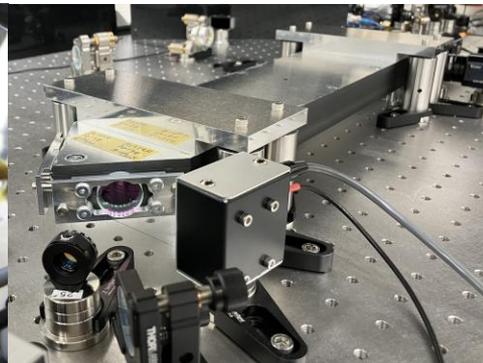
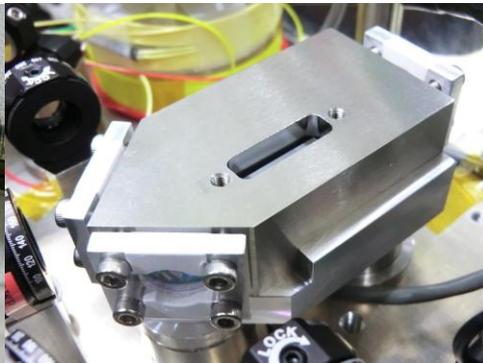
スライドはこちら
<https://tinyurl.com/YM20250418>

自己紹介



- 2006年 東京大学 理科一類入学
- 2008年 理学部 物理学科進学 (天文と迷った)
- 2015年 博士(理学)取得
- 2014-2022年 東京大学 物理学専攻 助教
- 2022-2024年 カリフォルニア工科大学
Research Scientist at LIGO Laboratory
- 2024年4月から 東京大学 理学系 准教授
- 実験による重力の研究

地上(KAGRA)・宇宙(DECIGO)の重力波検出器
ダークマター探索、重力の量子性検証



ビッグバン宇宙国際研究センター

- 初代センター長: 佐藤勝彦
- 3つのプロジェクト
 - 宇宙の進化と構造形成
 - 重力波宇宙物理学と重力実験
 - 惑星系の形成とその諸性質の探求



横山順一(物理学専攻)
宇宙論
→Kavli IPMU機構長

Kipp Cannon(物理学専攻)
重力波データ解析

仏坂健太(物理学専攻)
中性子星合体などの理論・観測

茂山俊和(天文学専攻)
超新星爆発などの理論・観測
センター長

道村唯太(物理学専攻)
重力波・重力実験

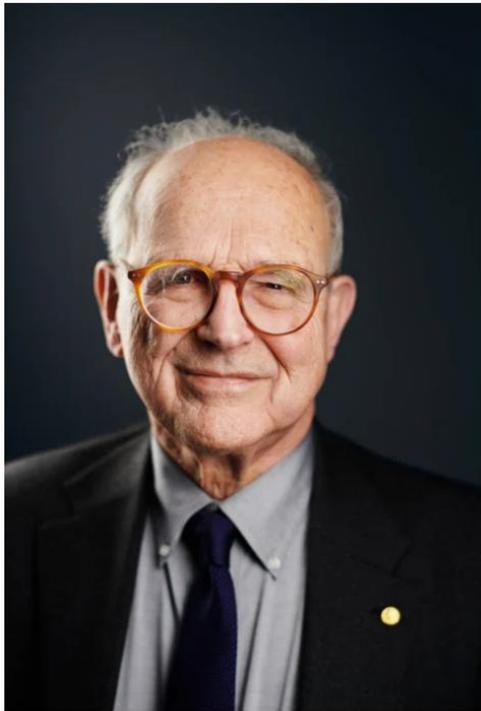


2024年9月のサマースクール



2017年 ノーベル物理学賞

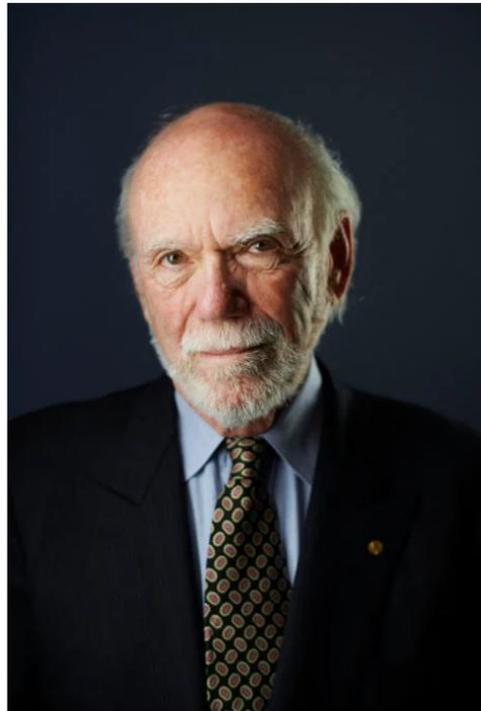
- LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Rainer Weiss

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Barry C. Barish

Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

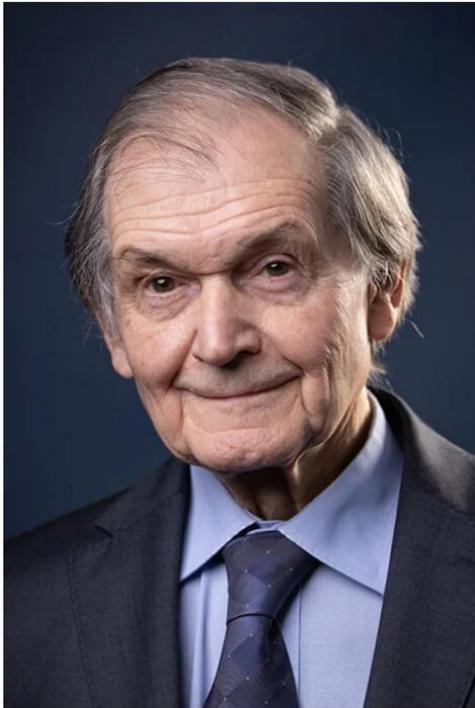
Kip S. Thorne

Prize share: 1/4



2020年 ノーベル物理学賞

- **ブラックホール**が形成されることは一般相対性理論の確固たる予言であることの発見
- 天の川銀河中心の**超巨大高密度天体**の発見



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Fergus Kennedy
Roger Penrose

Prize share: 1/2



© Nobel Prize Outreach. Photo:
Bernhard Ludewig
Reinhard Genzel

Prize share: 1/4

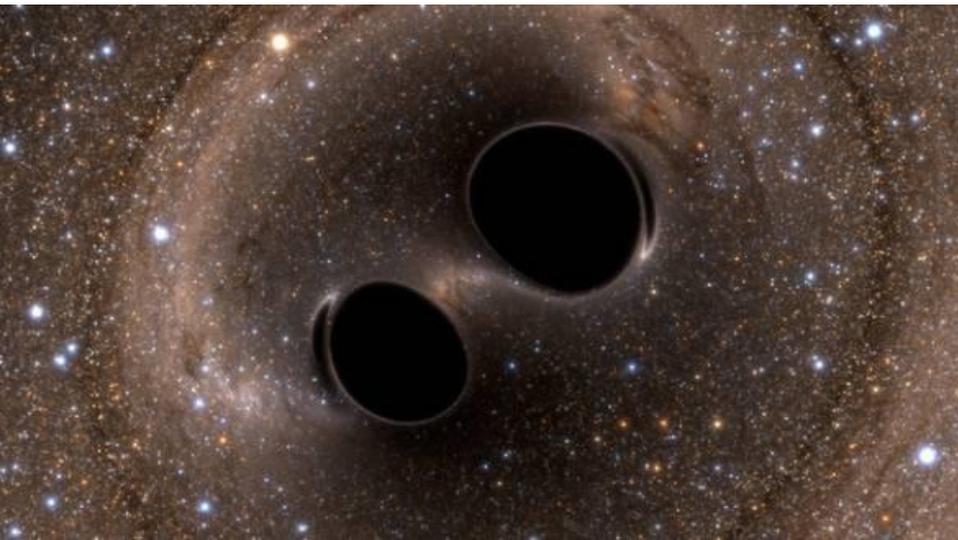


© Nobel Prize Outreach. Photo:
Stefan Bladh.
Andrea Ghez

Prize share: 1/4

今回のお話

- 一般相対性理論とブラックホール
- 重力波の初検出
- 重力波観測の現状
- レーザー干渉計型重力波望遠鏡の原理
- 岐阜県神岡の重力波望遠鏡KAGRA
- 重力波観測によるブラックホール研究の今後



参考文献

真貝寿明

ブラックホール・
膨張宇宙・重力波
一般相対性理論の100年と展開



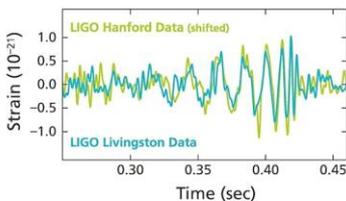
アインシュタインの想像を超えた世界とは？
現代物理学の最先端

- ブラックホールは「特異点」を隠すのか —
- 「ダークエネルギー」をどう解釈するか —
- 「重力波の直接検出」は可能か —

今日の主流研究テーマを読む

Frontiers in Physics 17

重力波物理の最前線



川村静児 [著]



基本法則から読み解く**物理学最前線**

須藤彰三 [監修]
岡 真

17

共立出版

BLUE BACKS

重力波とは なにか

「時空のさざなみ」が拓く新たな宇宙論

安東正樹



第一人者がやさしく解説する
「大発見の意味」

科学新書
No. 1

ついに人類は
「宇宙誕生の謎」を
解く鍵を手に入れた!

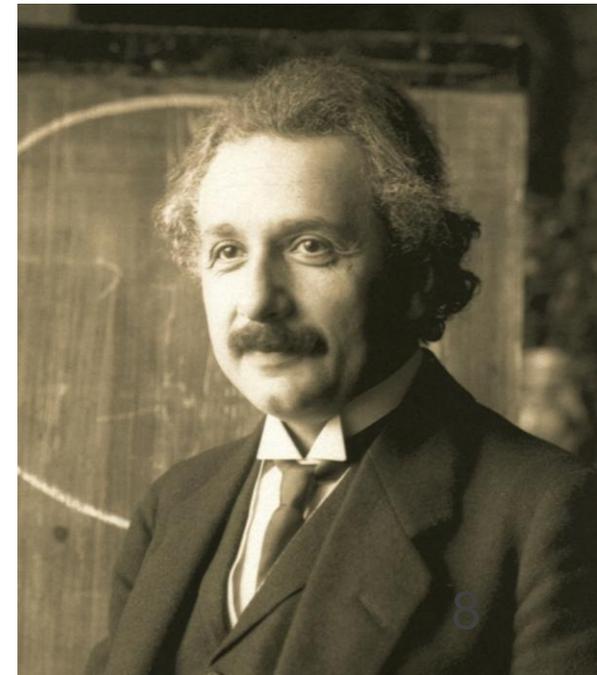
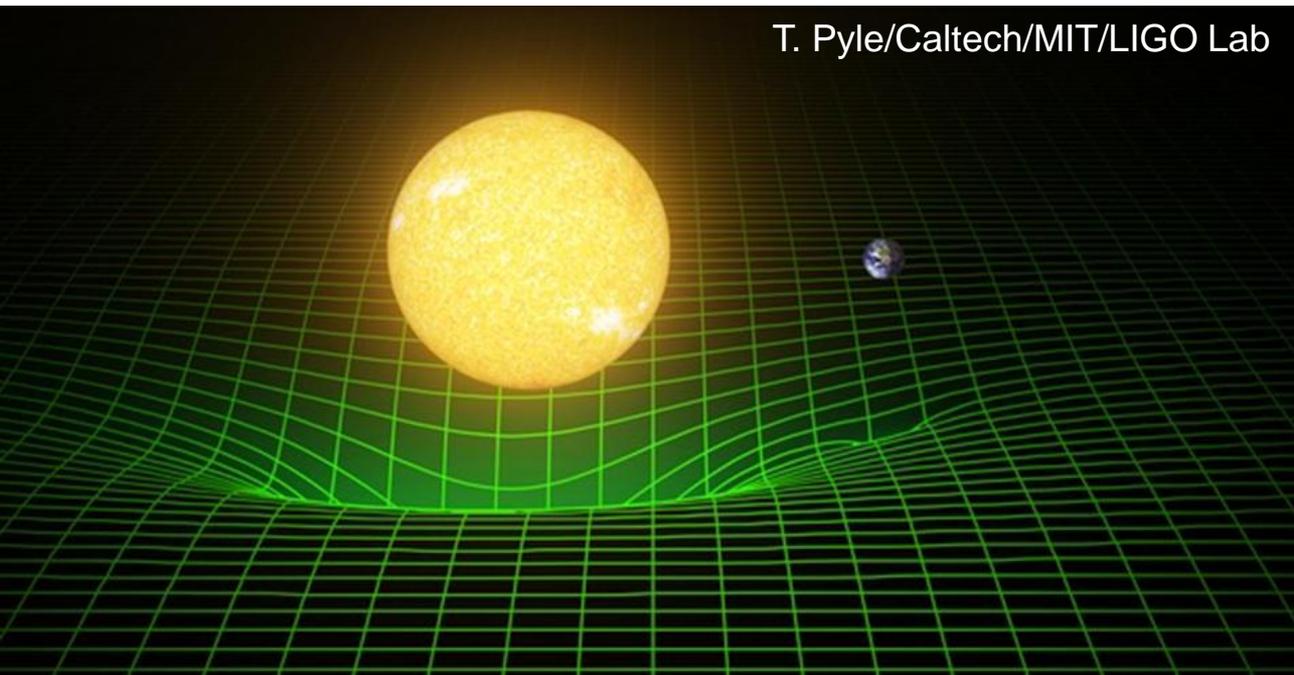
アインシュタインの一般相対性理論

- 1915年にアインシュタインが発表
- 質量があると時空が歪む、
時空の歪みで物体の動きが変わる

c: 光速
G: 万有引力定数

アインシュタイン方程式 $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

時空の曲がり 質量の分布



一般相対性理論における重力

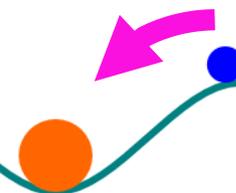
- 質量があると時空が**歪む**
- この歪みで物体を引きつけるのが**重力**

なにもないトランポリンは平ら



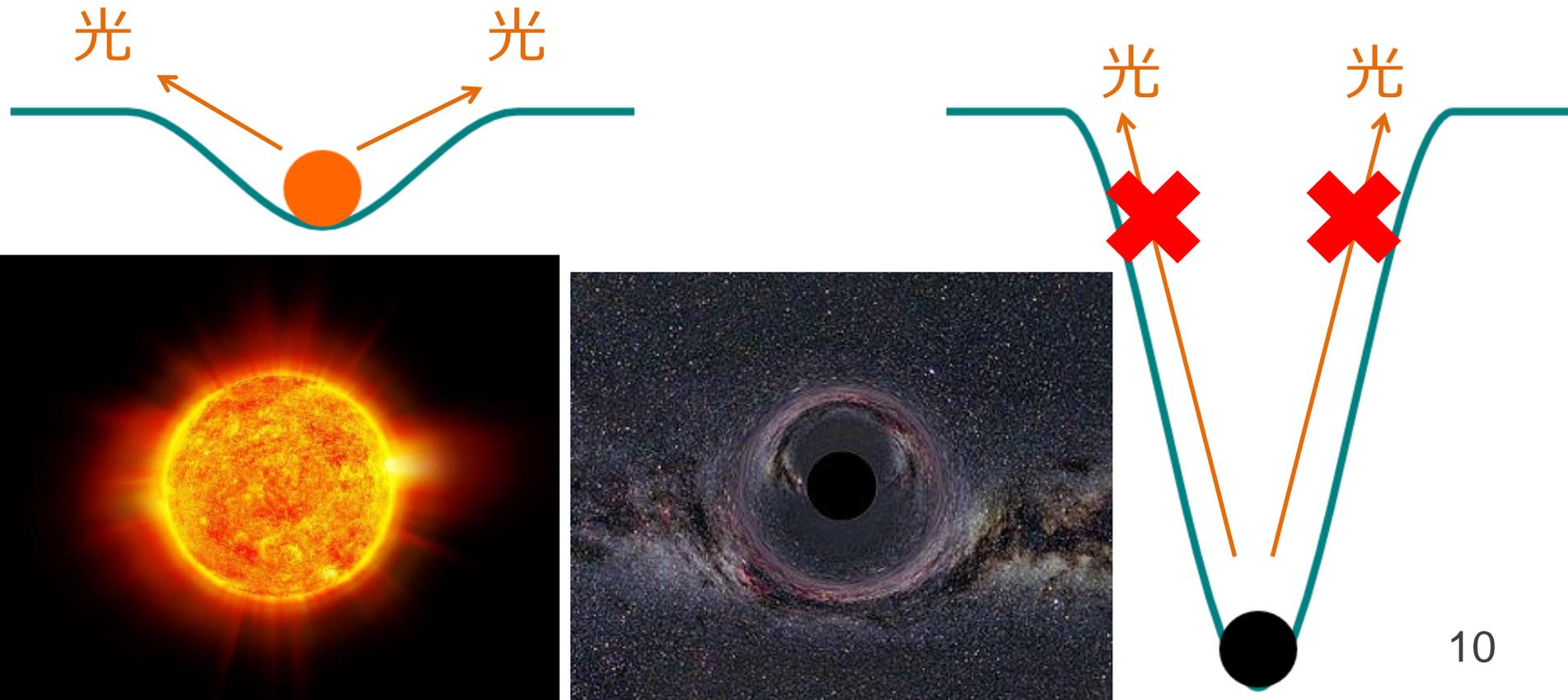
ボールを置くと
トランポリンが歪む

近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる



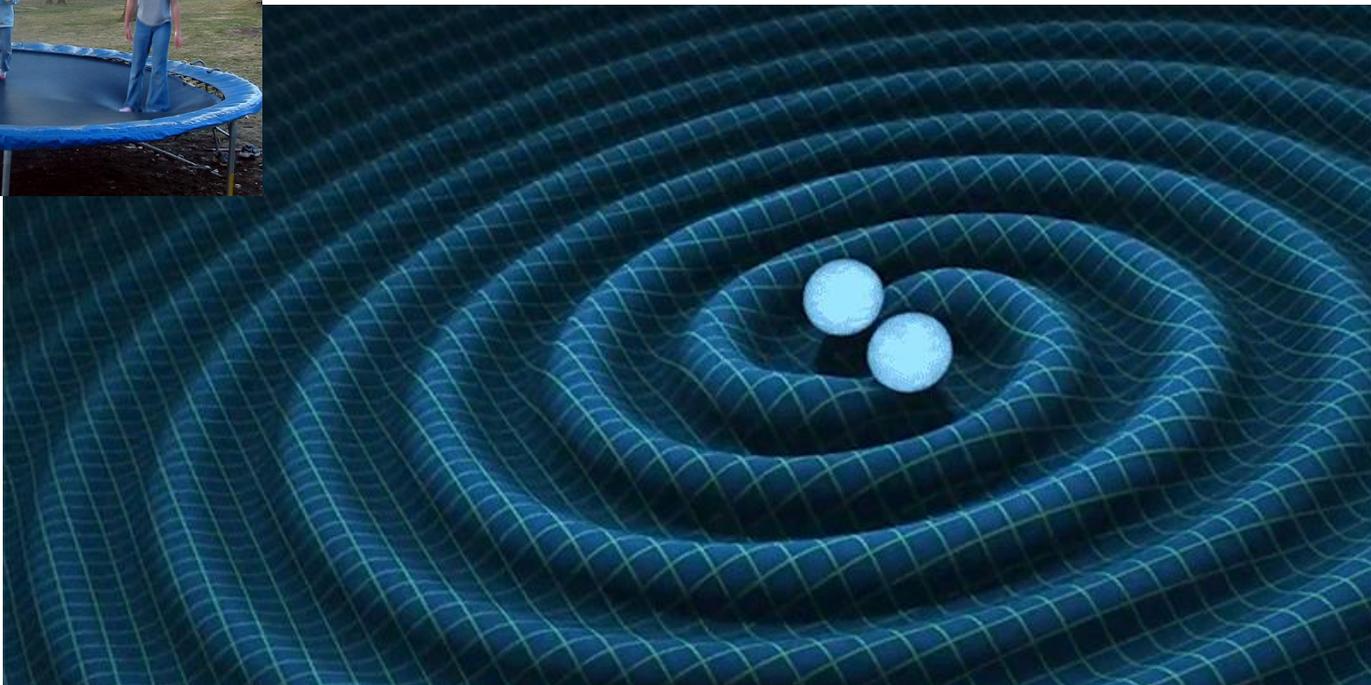
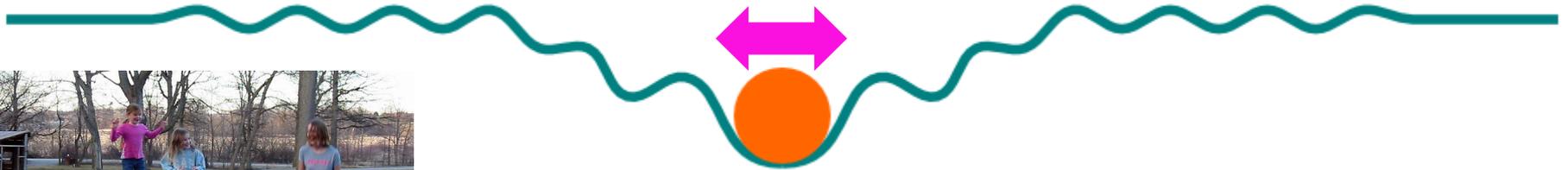
ブラックホール

- 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
光で直接見ることもできない天体



重力波は「時空のさざ波」

- 物体が動くと空間の歪みが増え、光の速さで伝搬する → これが重力波
 - 2016年にアインシュタイン自身が導出
- 重力が伝わる速度は有限

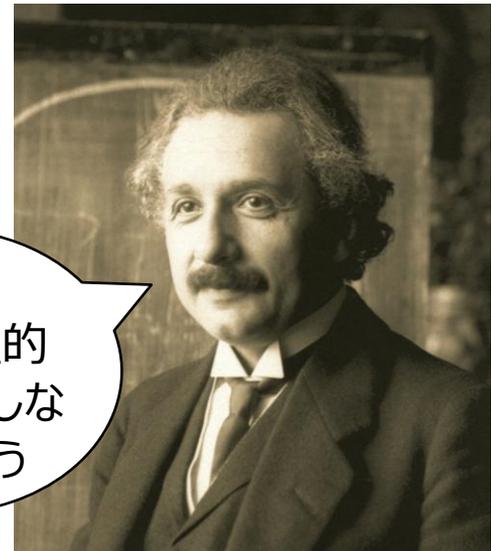


ブラックホールの理論研究の出発点

- 1915年11月25日 アインシュタイン方程式を発表
- 1916年1月13日 ロシア戦線にいたシュバルツシルトが**厳密解**を導出、アインシュタインに論文送る
シュバルツシルト解
球対称で回転しないブラックホール



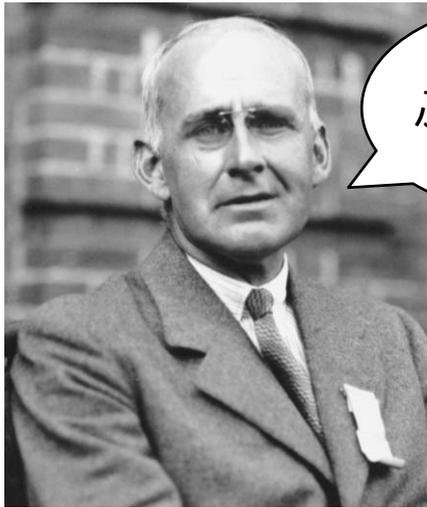
なんか
解けたわ



すご！
でも物理的
に実在はしな
いでしょ

重い星の最後はどうなるのか？

- 1930年 チャンドラセカル限界の発見
 - 白色矮星の質量の上限(1.4太陽質量)
 - 電子の縮退圧
 - 相対性理論と量子力学を組み合わせた最初の例
 - これより重い星はブラックホールになる？



エディントン
(1930年当時47歳)

星がそんな
ふるまいする
わけない

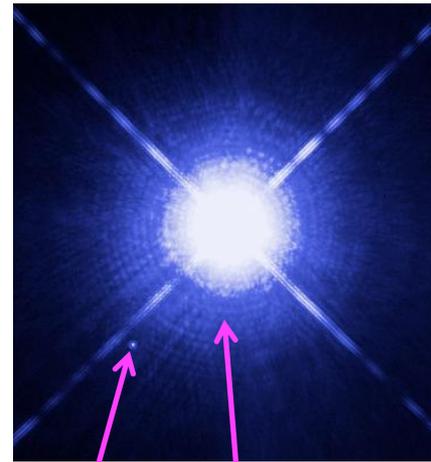


しゅん...



1983年

1930年に19歳で大学卒業
ケンブリッジに向かう船上で発見

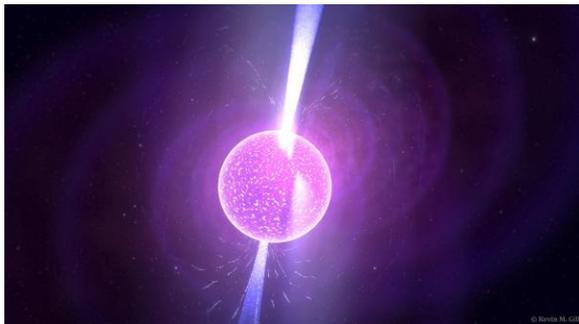


シリウスA
(2太陽質量)
シリウスB
(白色矮星、1太陽質量、
太陽密度の約300万倍)



重い星の最後はどうなるのか？

- 1939年トルマン・オッペンハイマー・ヴォルコフ
限界の発見
 - 中性子星の質量限界(約2太陽質量)
 - 中性子の縮退圧
- 1939年 オッペンハイマーとシュナイダーが大質量
星の重力崩壊でブラックホールができそうと検討
- 1939年9月 第二次世界大戦勃発

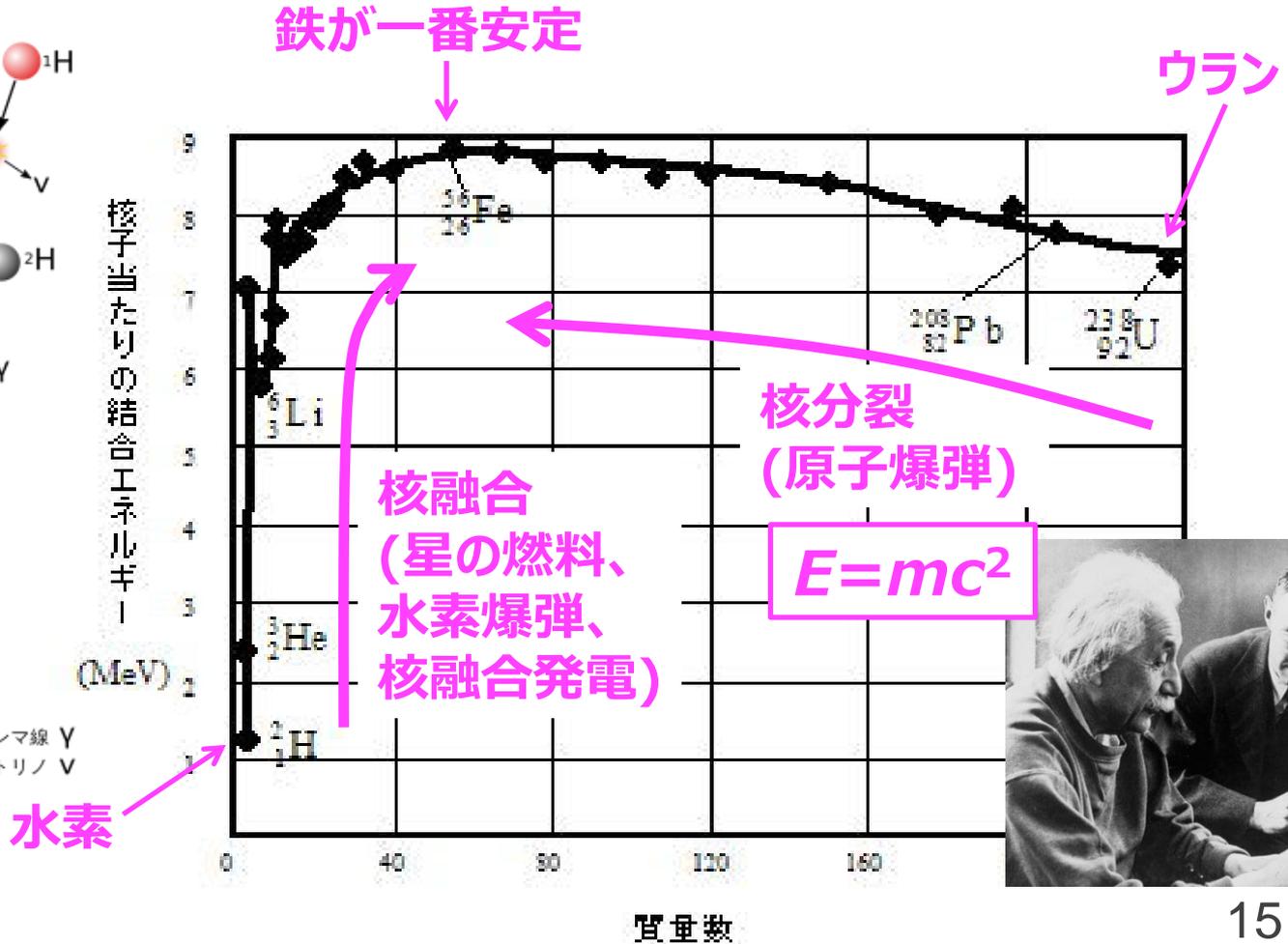
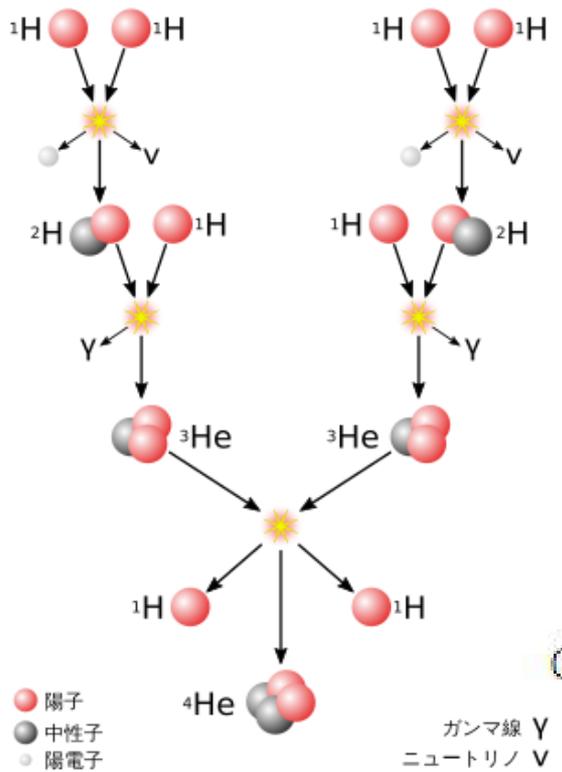


中性子星の密度は
太陽の 10^{14} 倍くらい
(角砂糖1個で1億トン)



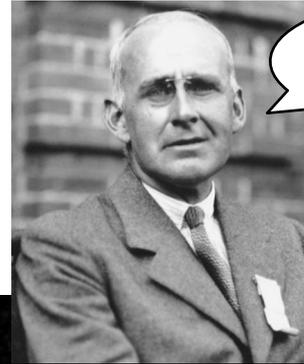
核融合と核分裂

- 星は核融合で光っていて、重力を支えている
- 燃料がなくなると、重力崩壊する



中性子星とブラックホールの大きさ

- 中性子星は半径約10 km
- ブラックホールは30太陽質量だと半径約90 km

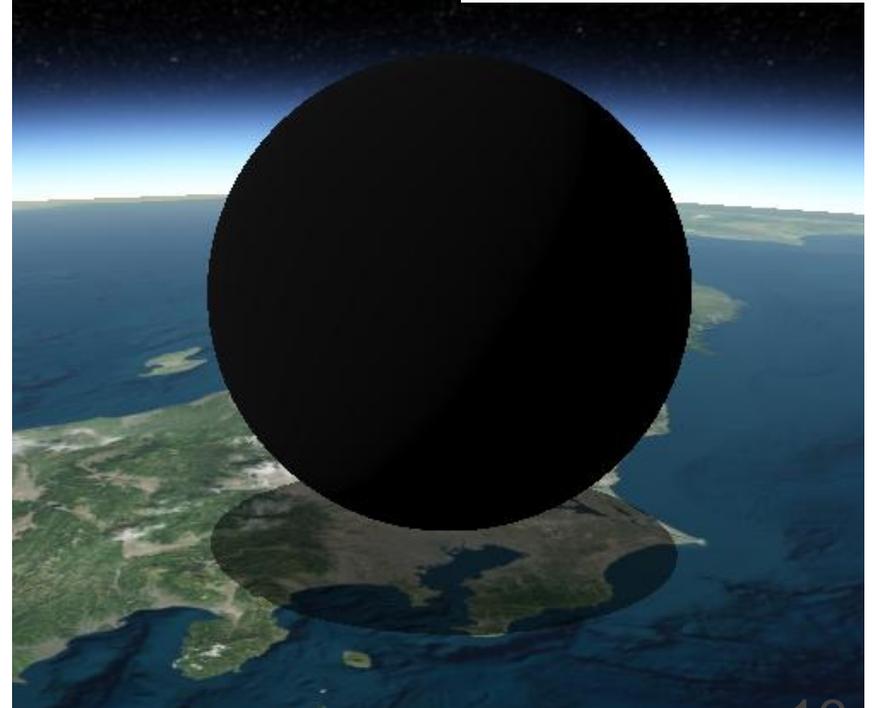


そんなわけない

そんなわけない



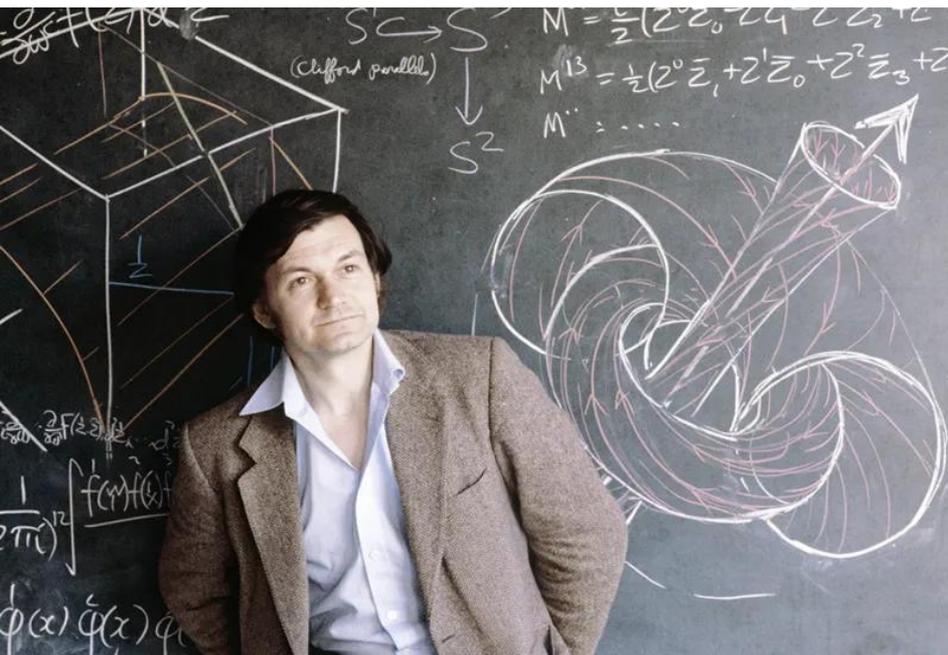
ホイーラー
1967年に「ブラックホール」
という言葉を導入





ペンローズが数学的に証明

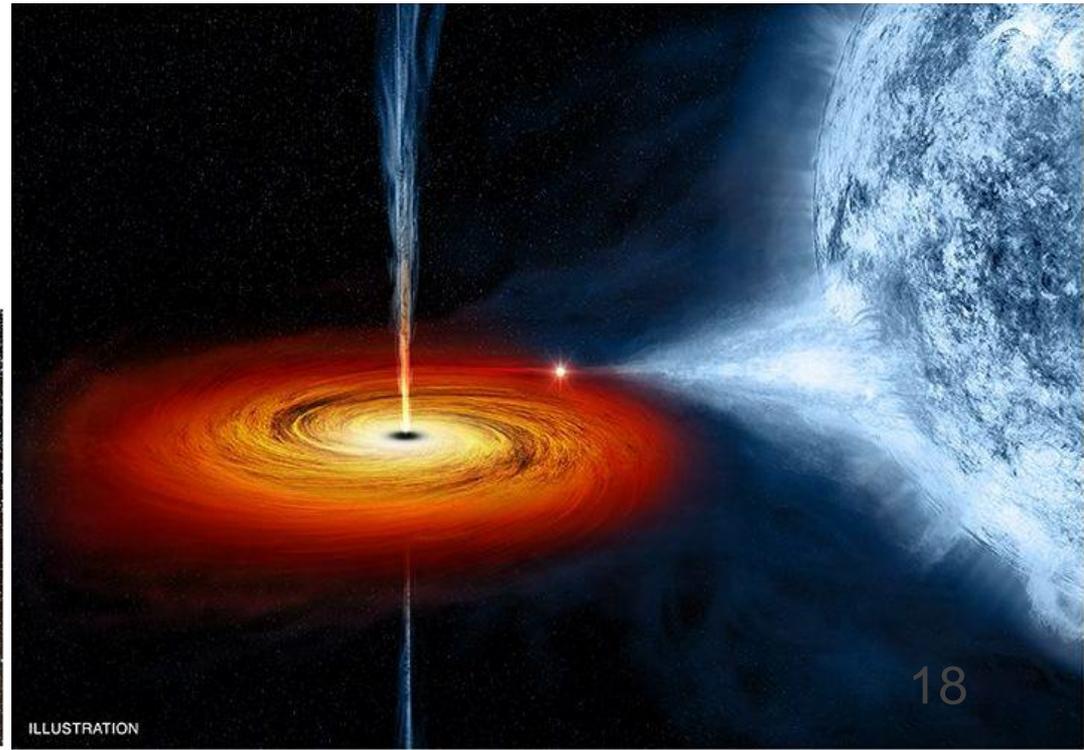
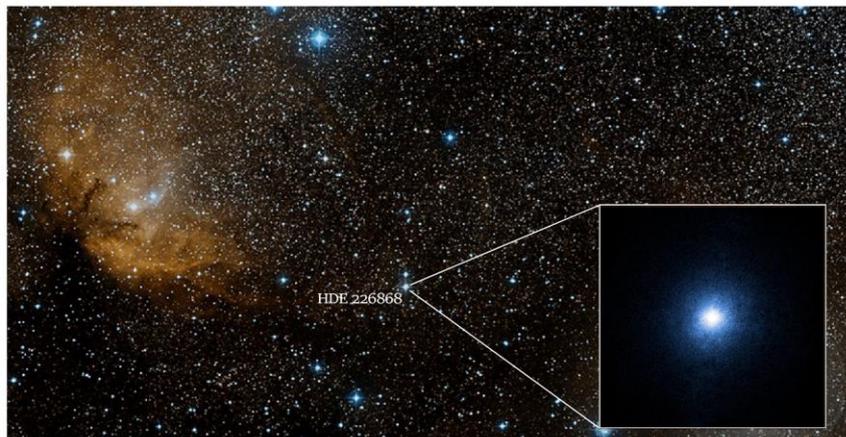
- 1965年 ペンローズが特異点定理を発表
星の重力崩壊によって時空の特異点ができることを数学的に証明(球対称でなくても)
- 1970年 ペンローズ・ホーキングの特異点定理
宇宙のはじまりも特異点であったことを証明



ブラックホールの観測的発見

- 1960年代 X線による天文観測が始まる
- 1964年 はくちょう座X-1の発見
強いX線放射、大きな質量(太陽の10倍以上)
→青色超巨星とブラックホールの連星
- 現在までに30個
以上の同様の天体

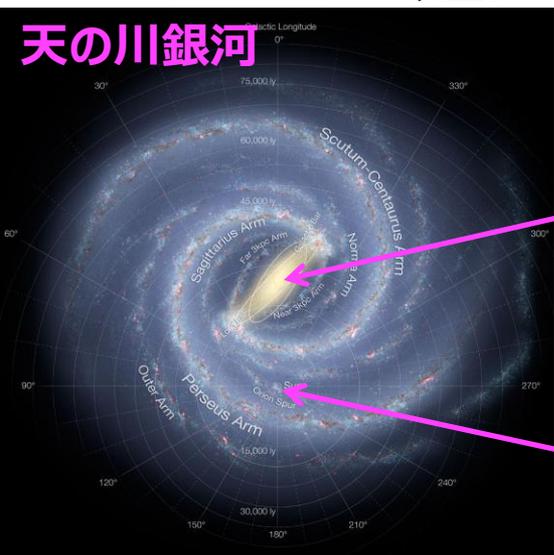
X線衛星Chandraによる
はくちょう座X-1





超大質量ブラックホールの発見

- 1967年 クエーサー(3C 273)の発見
非常に明るい(12.9等)、非常に遠い(24億光年)
→ 銀河中心の超大質量ブラックホールでは？
- 1990年代 ゲンツェルやゲズらが天の川銀河の中心領域の**恒星の運動を調べる**観測を主導
→ 太陽の**約400万倍の質量**をもつ
超大質量ブラックホールが銀河中心にいる



いて座A*

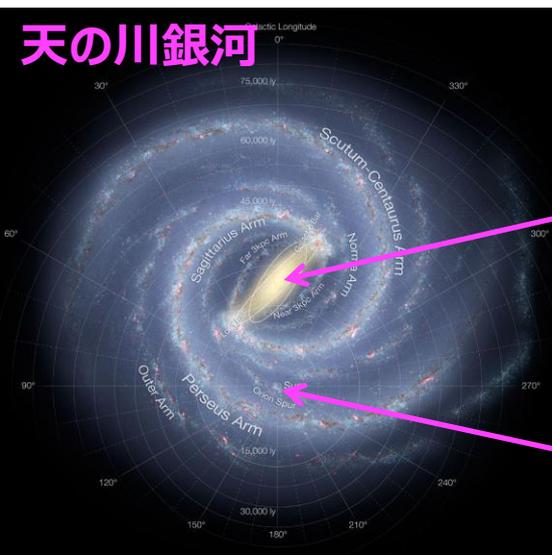
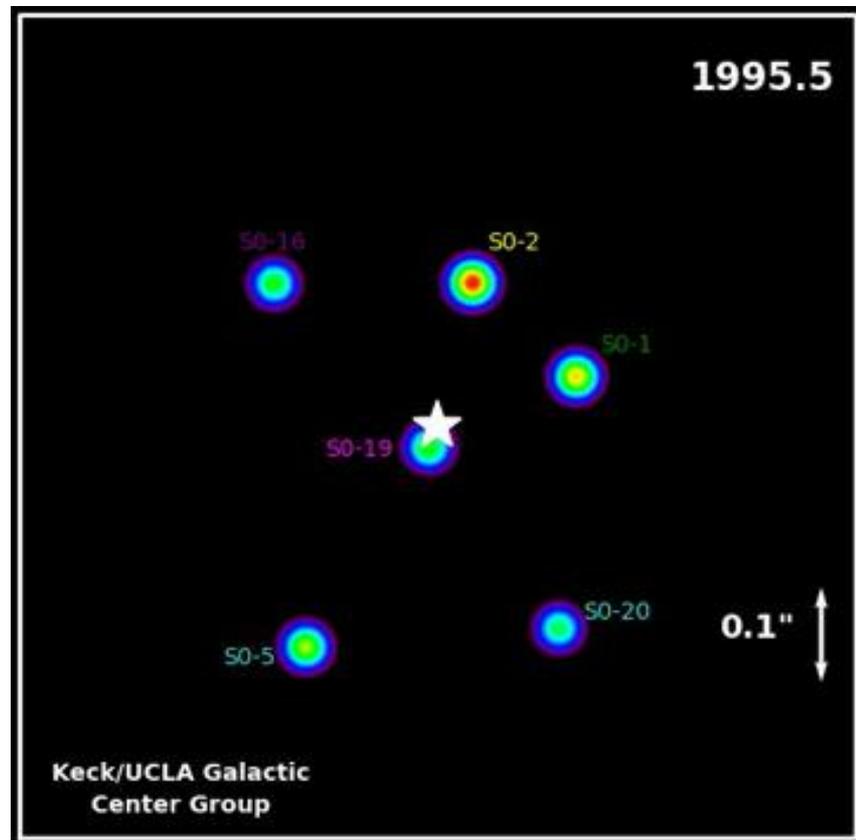
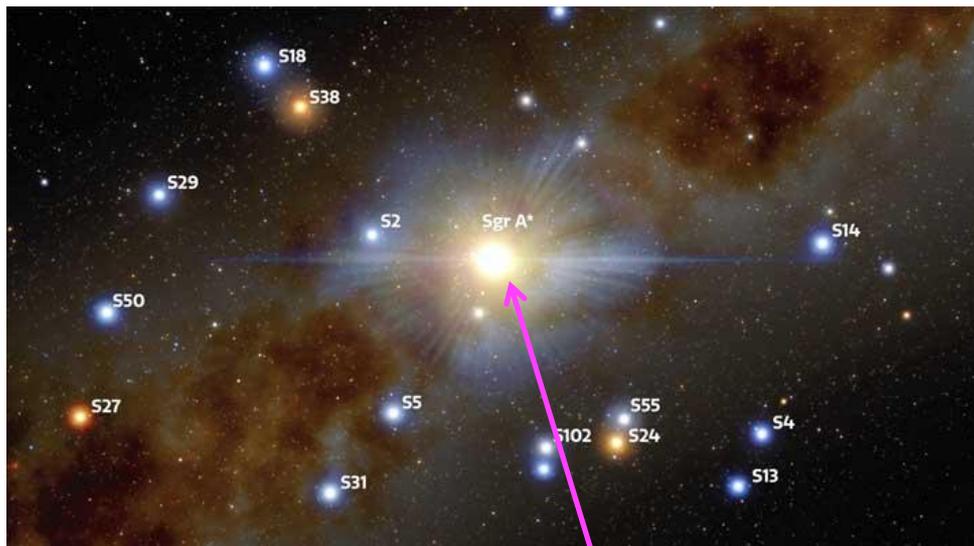
超大質量ブラックホール
我々から見て座の方向
にある

太陽系





超大質量ブラックホールの発見



天の川銀河

いて座A*

超大質量ブラックホール
我々から見て座の方向
にある

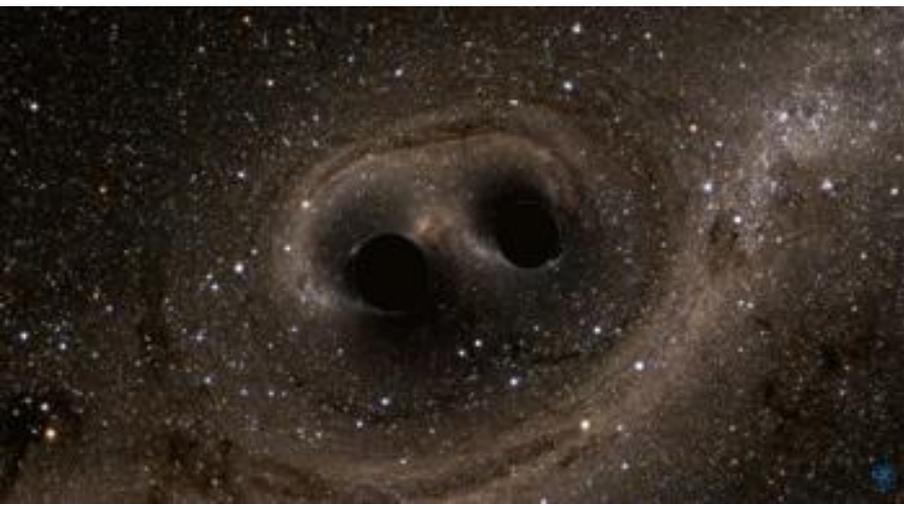
太陽系

<https://www.youtube.com/shorts/A2jcVusR54E>

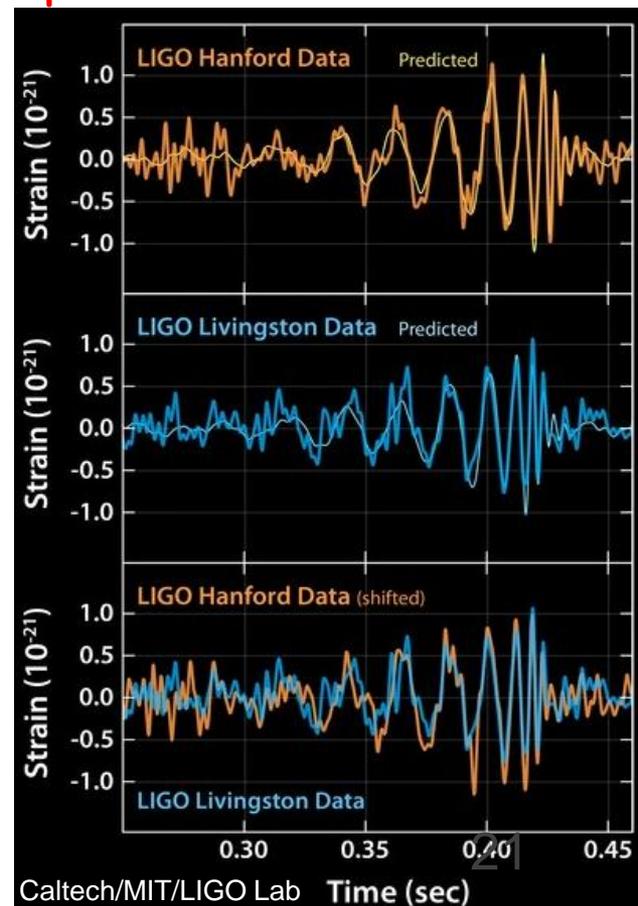


ブラックホールからの重力波初検出

- 2015年 アメリカの2台のLIGOが同時に検出
2つのブラックホールが**合体**した時の**重力波**
- アインシュタインの予言から**100年**
- 現在までに**300近く**の**重力波**を検出している
- ブラックホールを「見る」だけでなく、「**聴く**」時代に



スマホアプリ
も登場

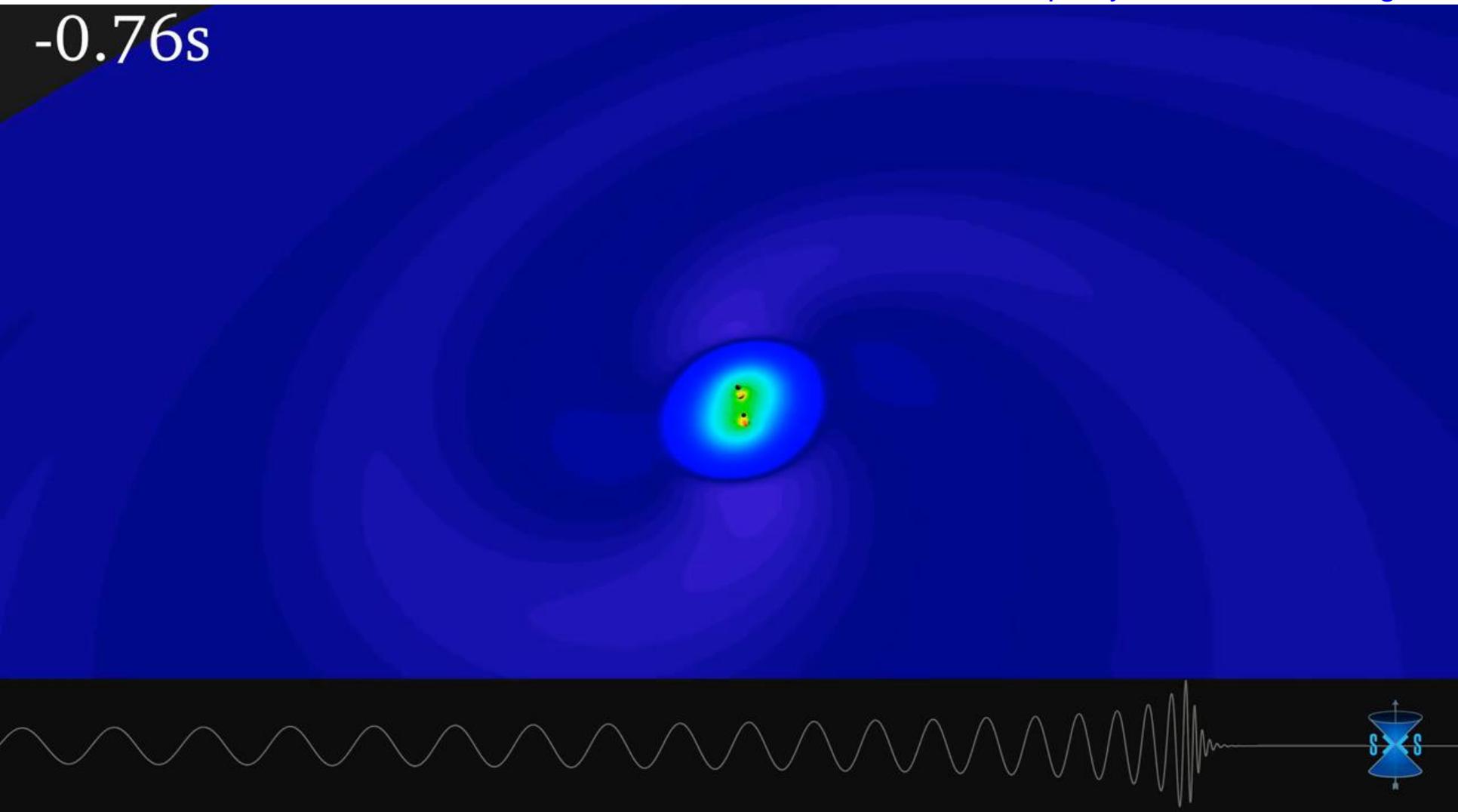


連星ブラックホール合体

- 2つのブラックホールが1つのブラックホールに

<https://youtu.be/c-2XluNFgD0>

-0.76s

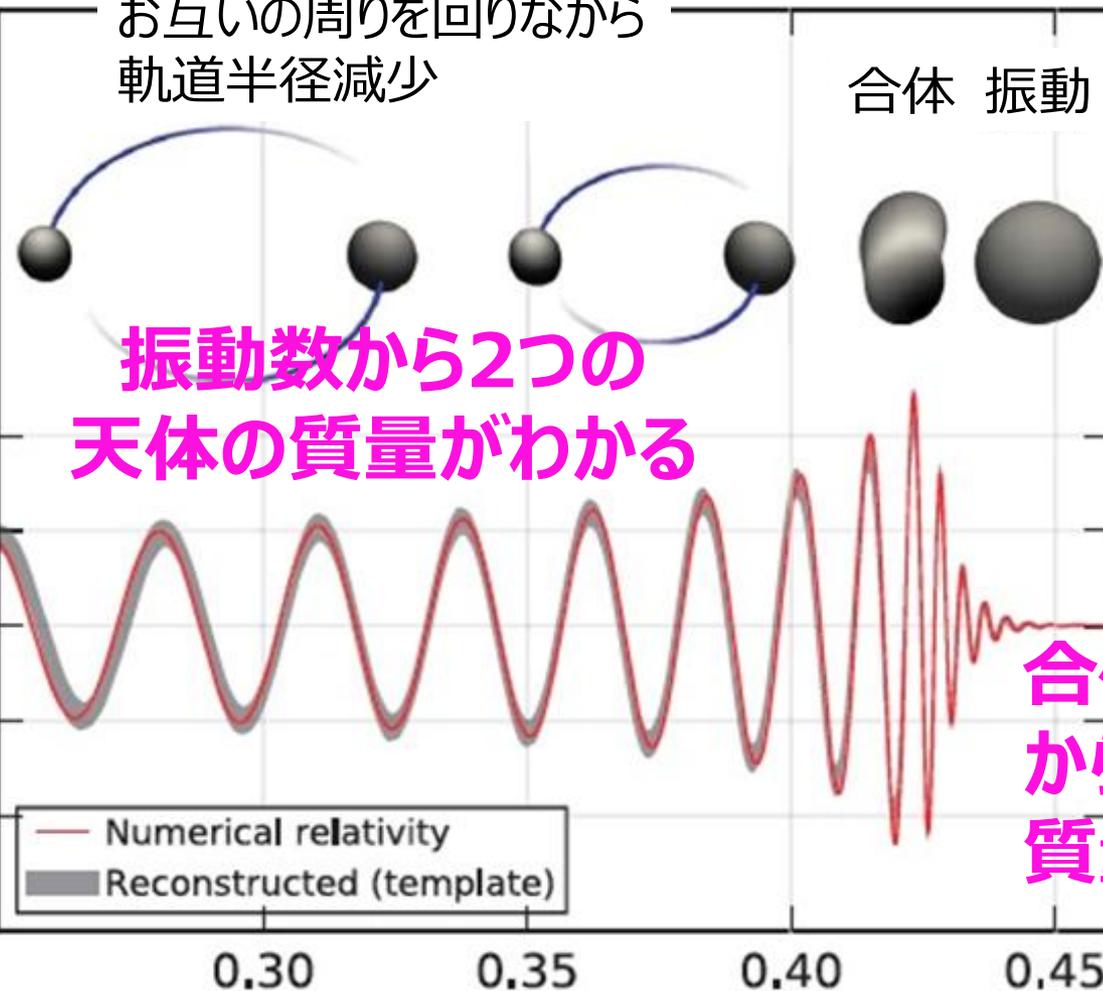


重力波形から距離と質量がわかる

- 約29太陽質量+約26太陽質量 = 約62太陽質量

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

重力波形から距離と質量がわかる

- 音の高低から**質量**、音の大きさから**距離**がわかるのと似ている

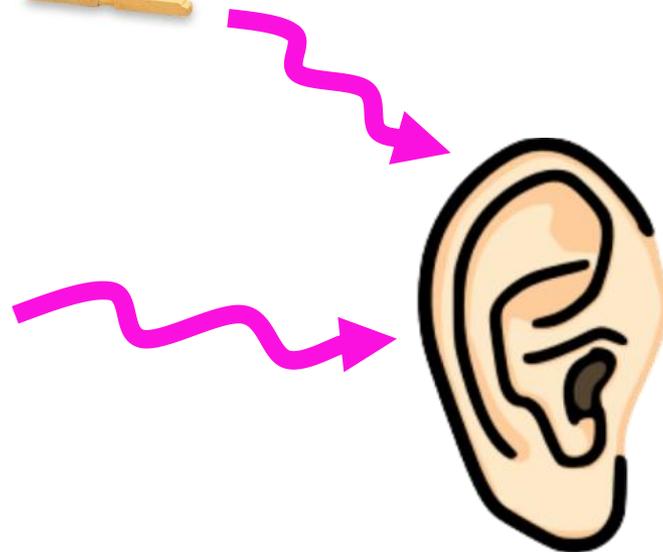
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音



聞こえてきた連星合体の音

https://youtu.be/gT1VwCTe_90

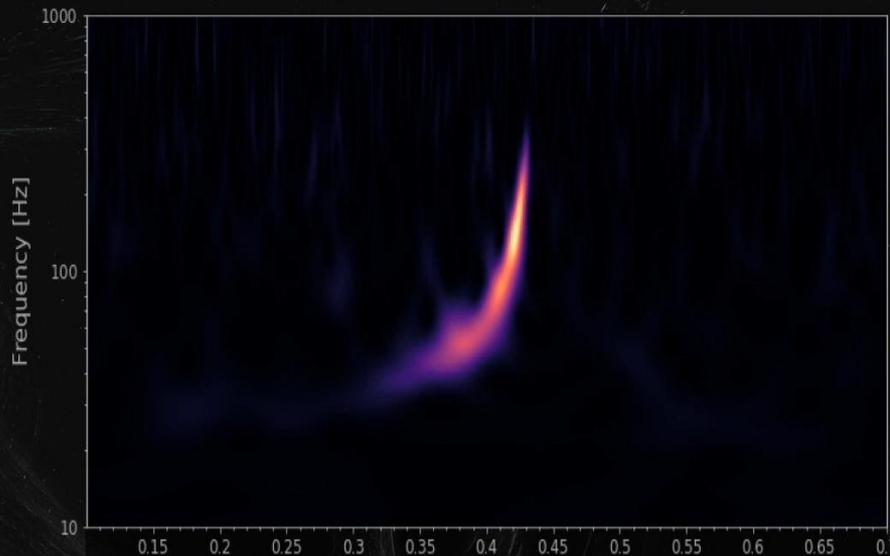
SOUND OF GRAVITATIONAL WAVES

GW150914

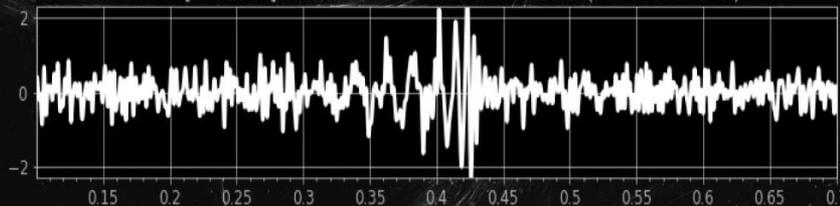
35.6 M_{\odot}

30.6 M_{\odot}

63.1 M_{\odot}



Time [seconds] from 2015-09-14 09:50:45 UTC (1126259462.0)



First detection, first black hole merger



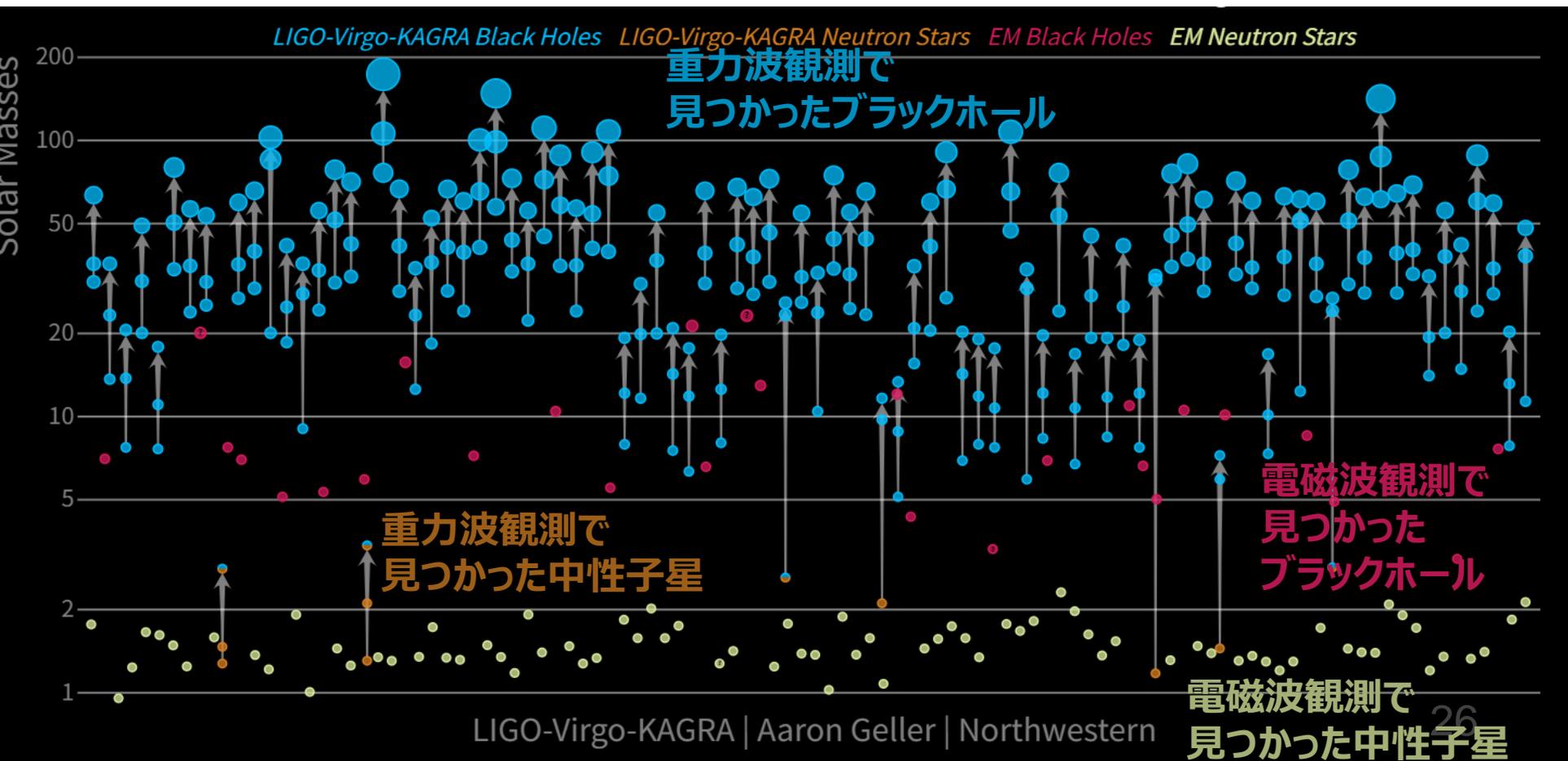
Audio signal to noise ratio exaggerated for clarity.

Time [year]

By: SYSTEM Sounds

これまで見つかったブラックホール

- X線などの観測では見えなかった
重いブラックホールを次々と検出



これまで見つかったブラックホール
銀河中心にある
超大質量ブラックホール
(~ 10 万太陽質量程度以上)



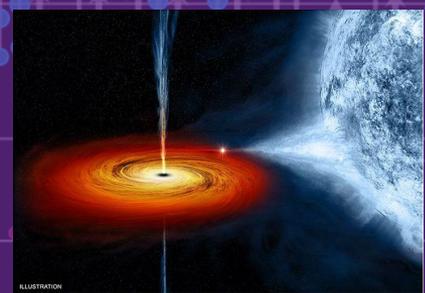
重いブラックホールを次々と検出
起源不明の中間質量ブラックホール
(~ 100 太陽質量程度以上)

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes | LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars

重力波観測で
見つかったブラックホール
ブラックホール? ($65-130$ 太陽質量程度)



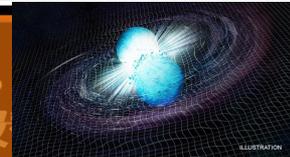
星の重力崩壊で生まれる
恒星質量ブラックホール
($5-65$ 太陽質量程度)



重力波観測で
見つかった中性子星
????? ($3-5$ 太陽質量程度)

電磁波観測で
見つかった
ブラックホール

中性子星 (~ 2 太陽質量程度以下)

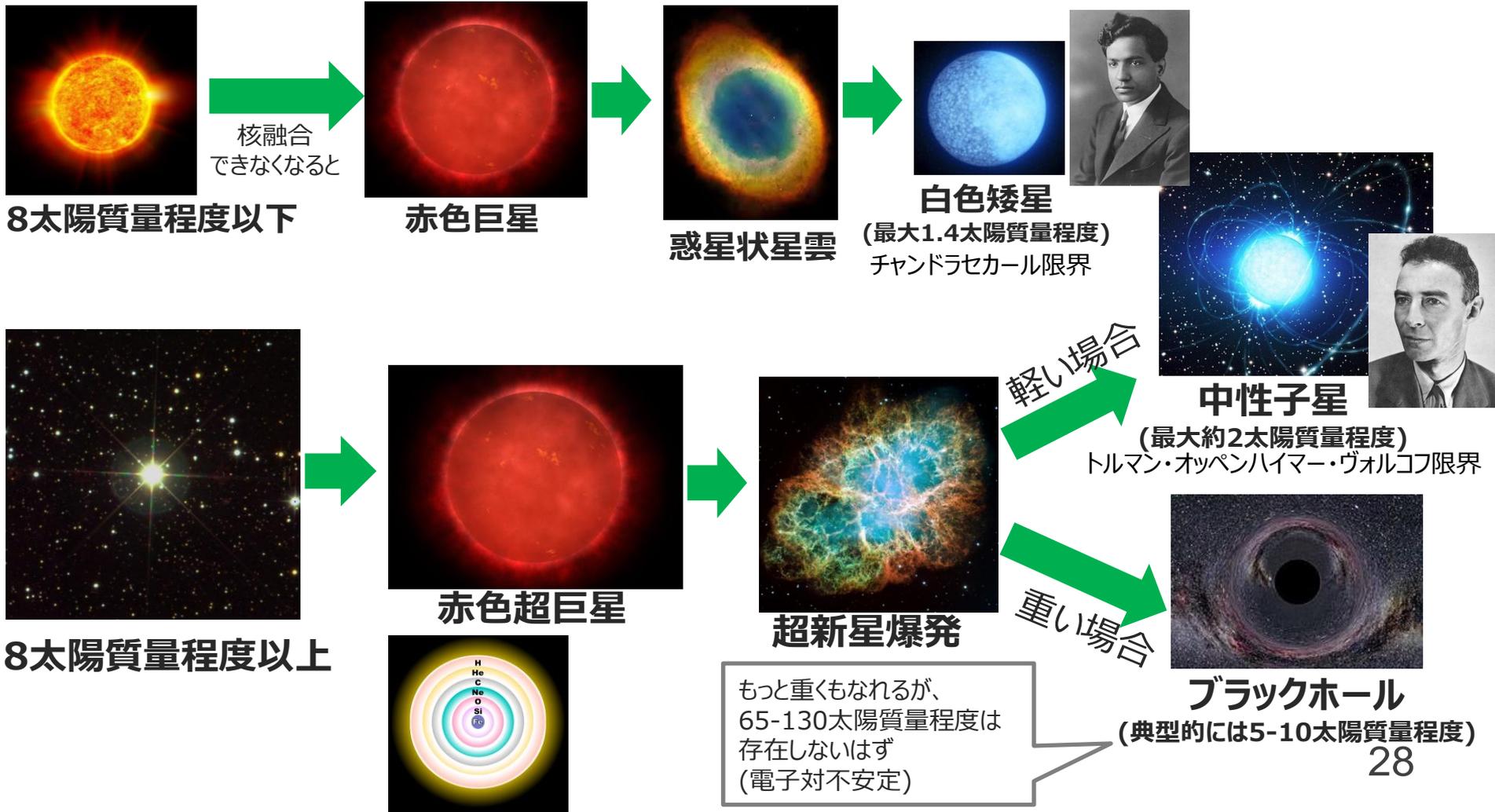


LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

電磁波
見つかった中性子星

重い星の一生

- 存在しないはずの質量のブラックホール
→ 合体を繰り返してブラックホールが成長？



ブラックホール・シャドウ

- 2019年 イベント・ホライズン・テレスコープが **M87**のブラックホールの撮影に成功
- 2022年 **いて座A***の撮影に成功

ブラックホールの影が撮影！

©EHT Collaboration



2019年4/10と2022年5/12(日本時間22時開始)の会見についてブラックホールの影(と光!)の観測画像が発表。EHTによる初検出。

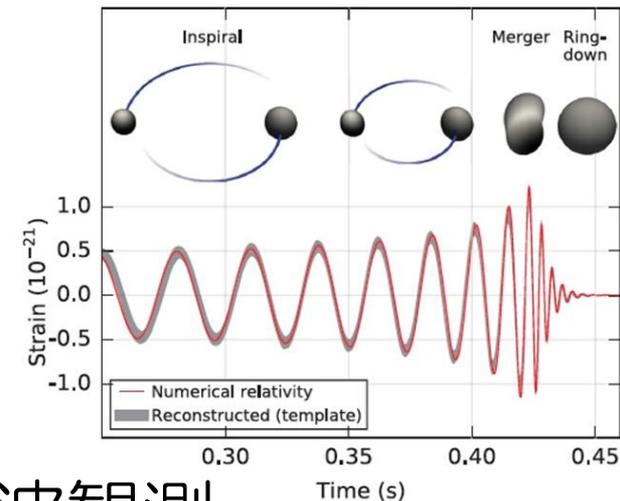
ブラックホール・シャドウ



Oliver James, Eugénie von Tunzelmann,
Paul Franklin and Kip S Thorne,
[Class. Quantum Grav. 32, 065001 \(2015\)](#)

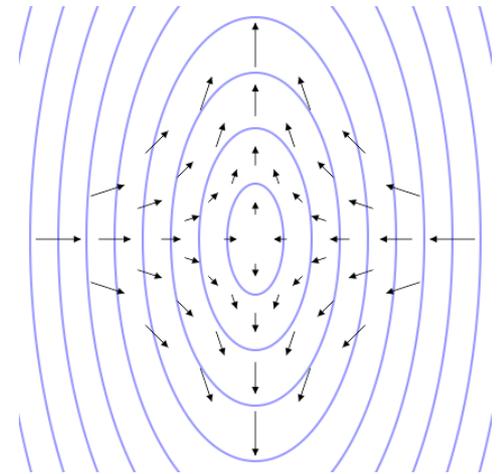
今後のブラックホール観測

- **重い**ブラックホールの起源はなにか？
- **中間質量**ブラックホール、**超大質量**ブラックホールはどのように形成されるのか？
- 中性子星とブラックホールの**間の質量**を持つ天体はなんなのか？
- 合体後のブラックホールの**準固有振動**？
- 今後の観測の方向性
 - 望遠鏡の**高感度化**
 - **さまざまな周波数帯**での重力波観測
 - 電磁波・ニュートリノ・重力波を組み合わせた**マルチメッセンジャー観測**

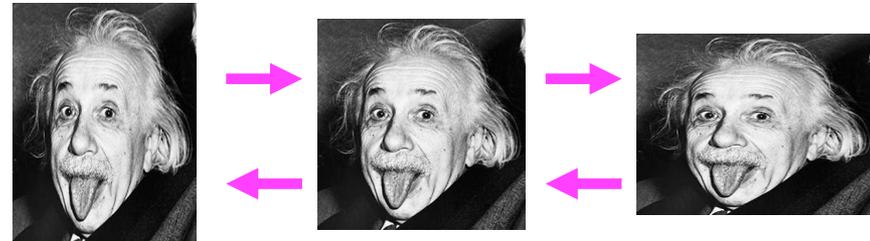


重力波初検出には100年もかかった

- 1915年 アインシュタイン、一般相対性理論を発表
- 1916年 重力波の存在を自らが予言
- 1936年 やっぱり重力波は存在しないと論文投稿
→ 反論されて激怒
- 2015年 重力波の**初検出**
- 重力波の空間の歪み量は
極めて小さい

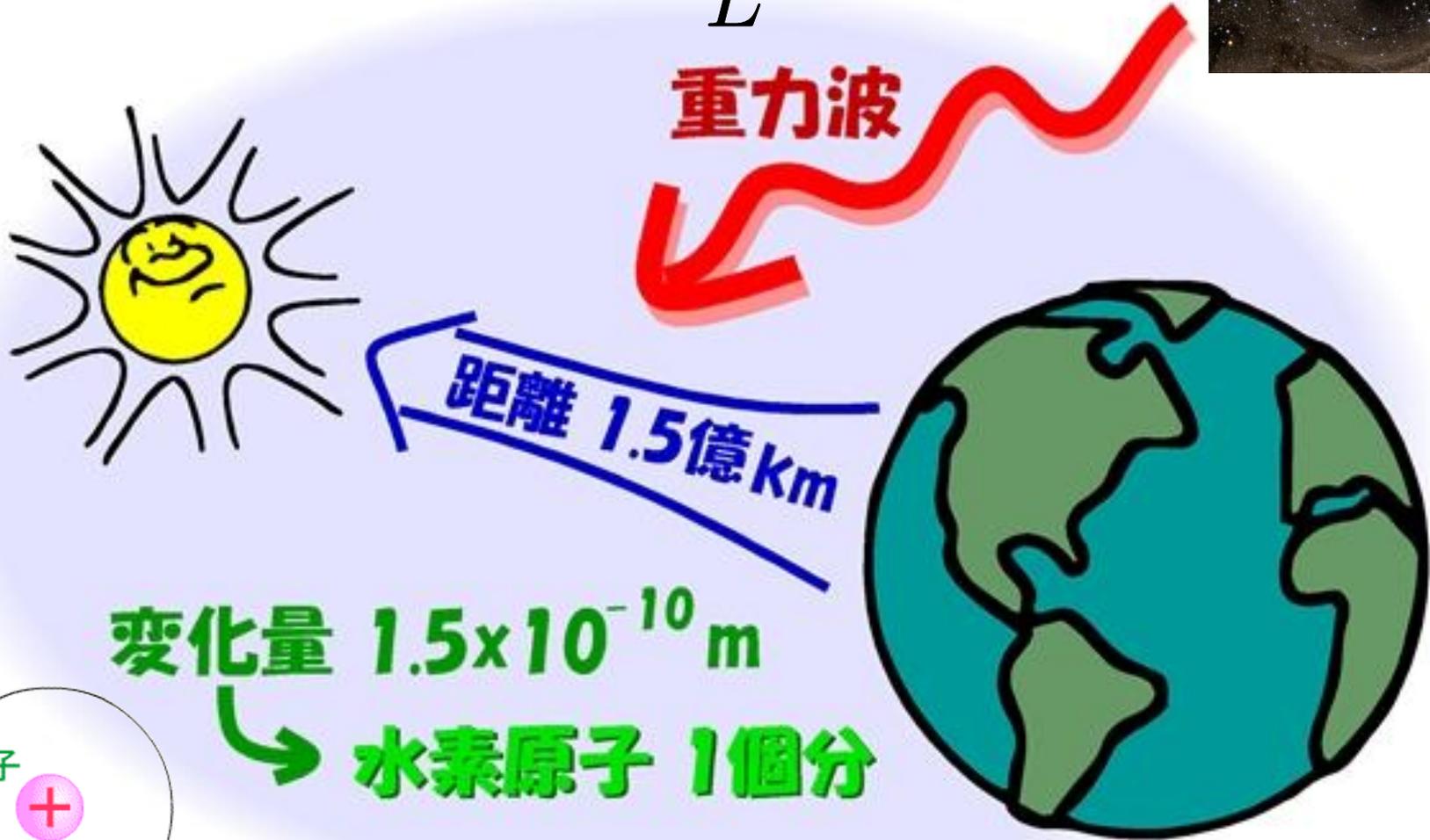
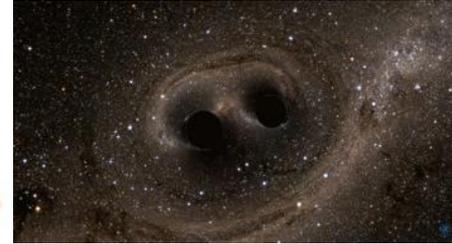


$$h = \frac{\delta L}{L} \sim 10^{-21}$$



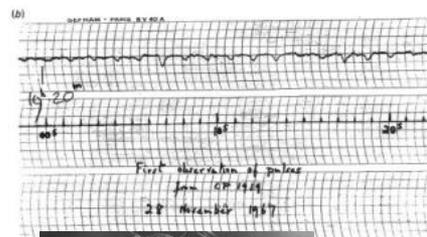
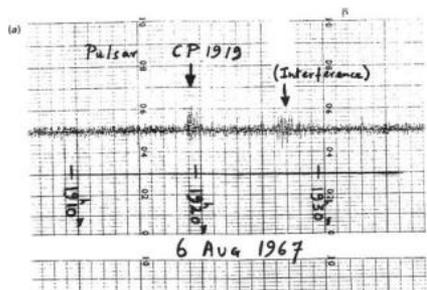
重力波の振幅はどれくらい？

- 空間の歪み量: $h = \frac{\delta L}{L} \sim 10^{-21}$

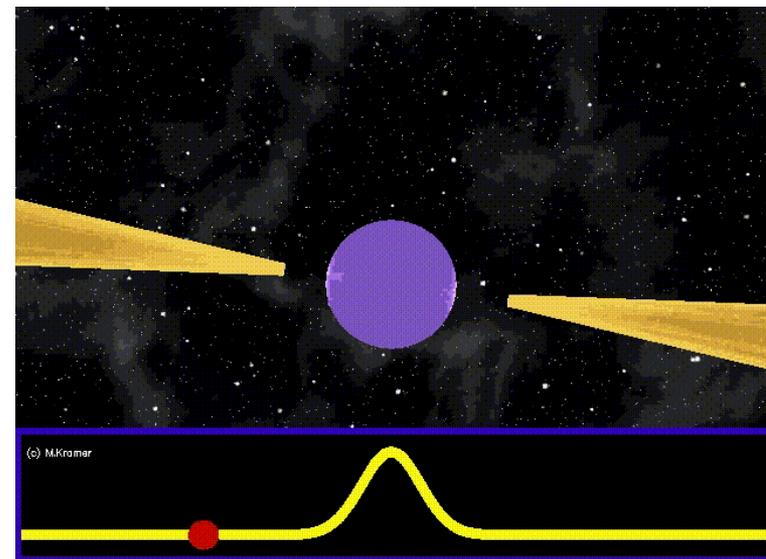


パルサーと重力波の間接的証拠

- 1967年 ベルとヒューイッシュが1.3373011秒ごと
発せられる0.04秒のパルス幅を持つ電波源を発見
→ **パルサー** (のちに中性子星とわかる)



1974年



Little green men 1

パルサーと重力波の間接的証拠

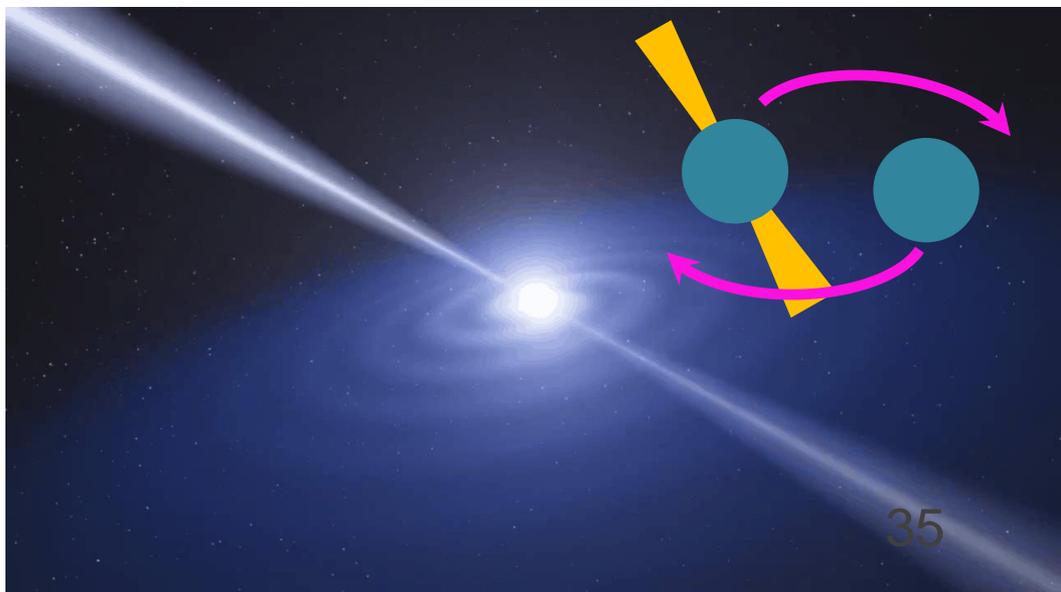
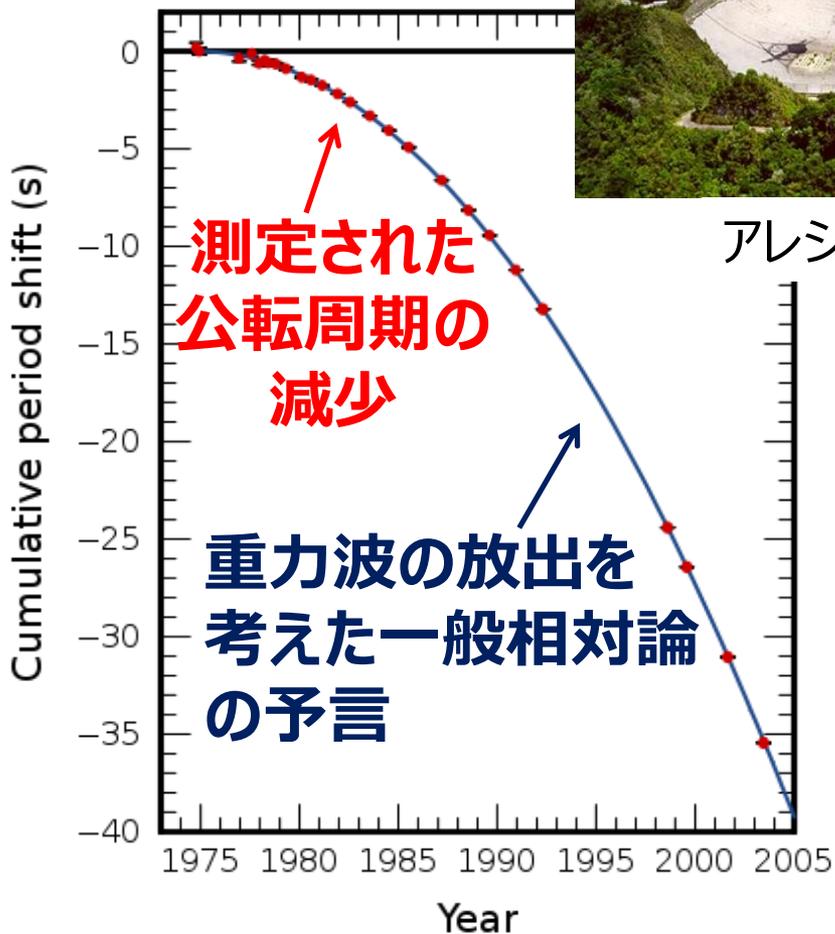
- 1974年 ハルスとテイラーが連星パルサーを発見



アレシボ望遠鏡



1993年



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



1972年の内部レポート

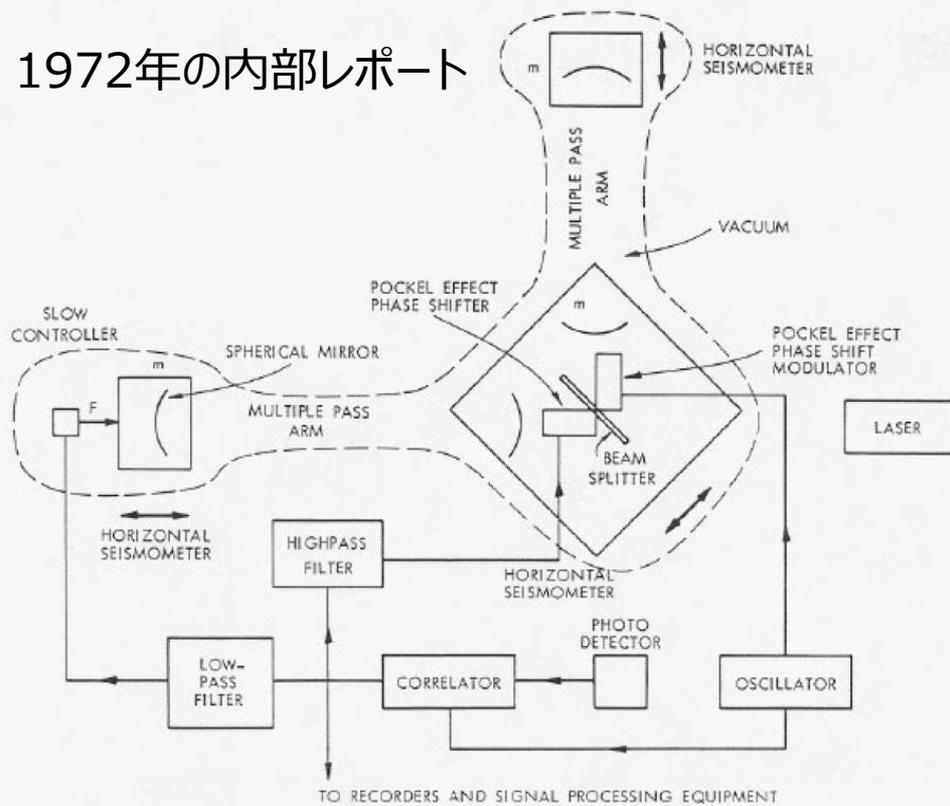
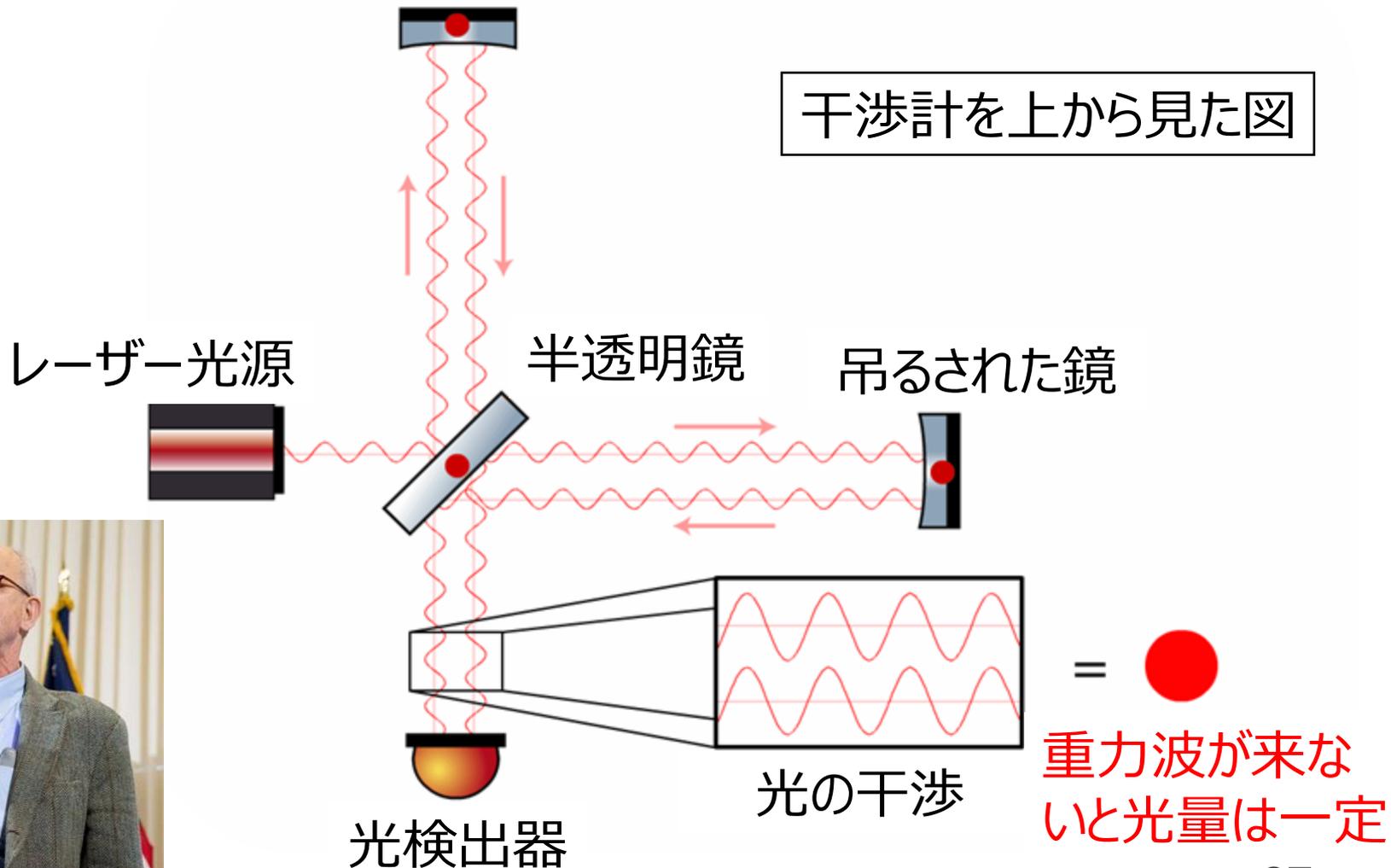


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



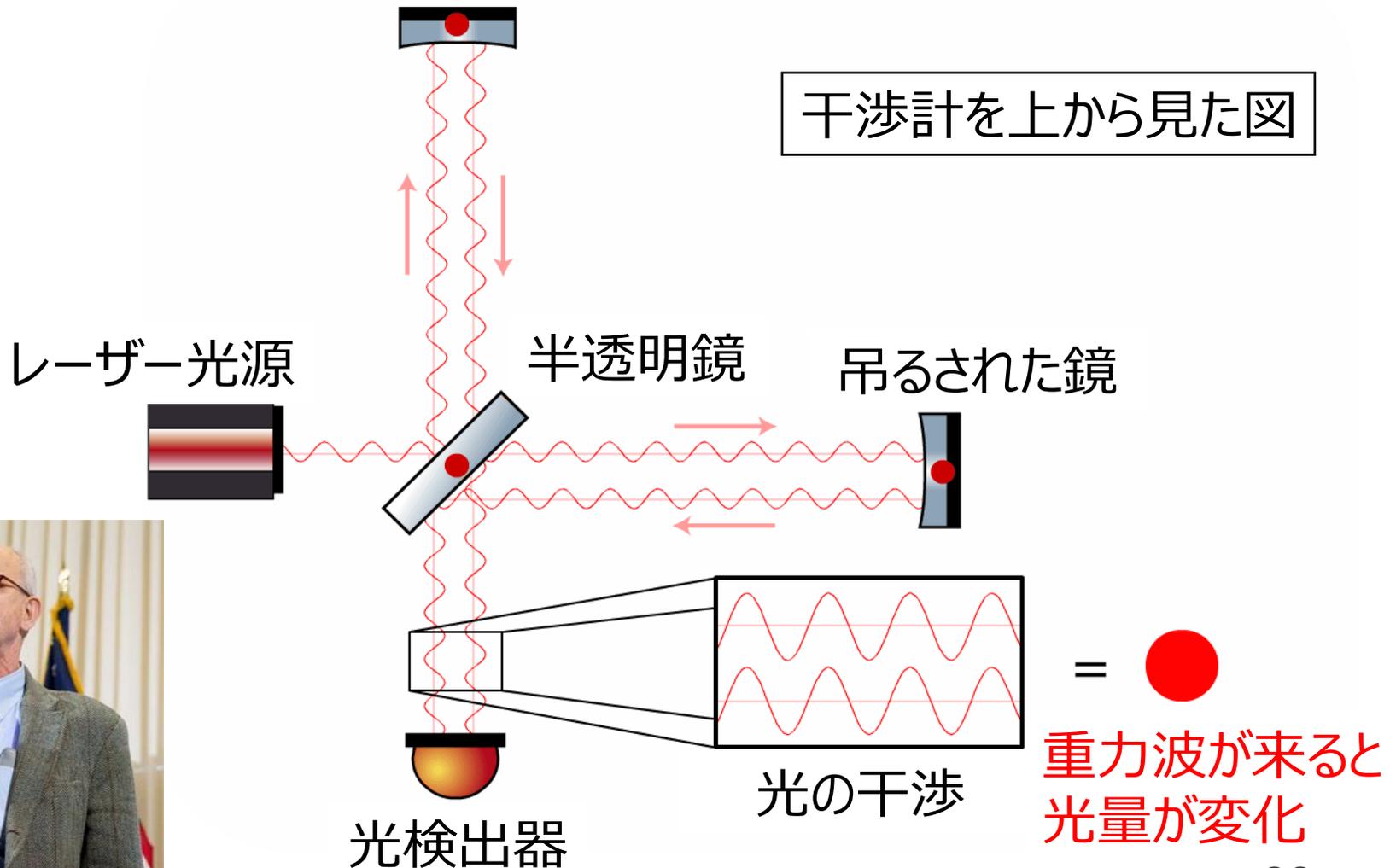
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



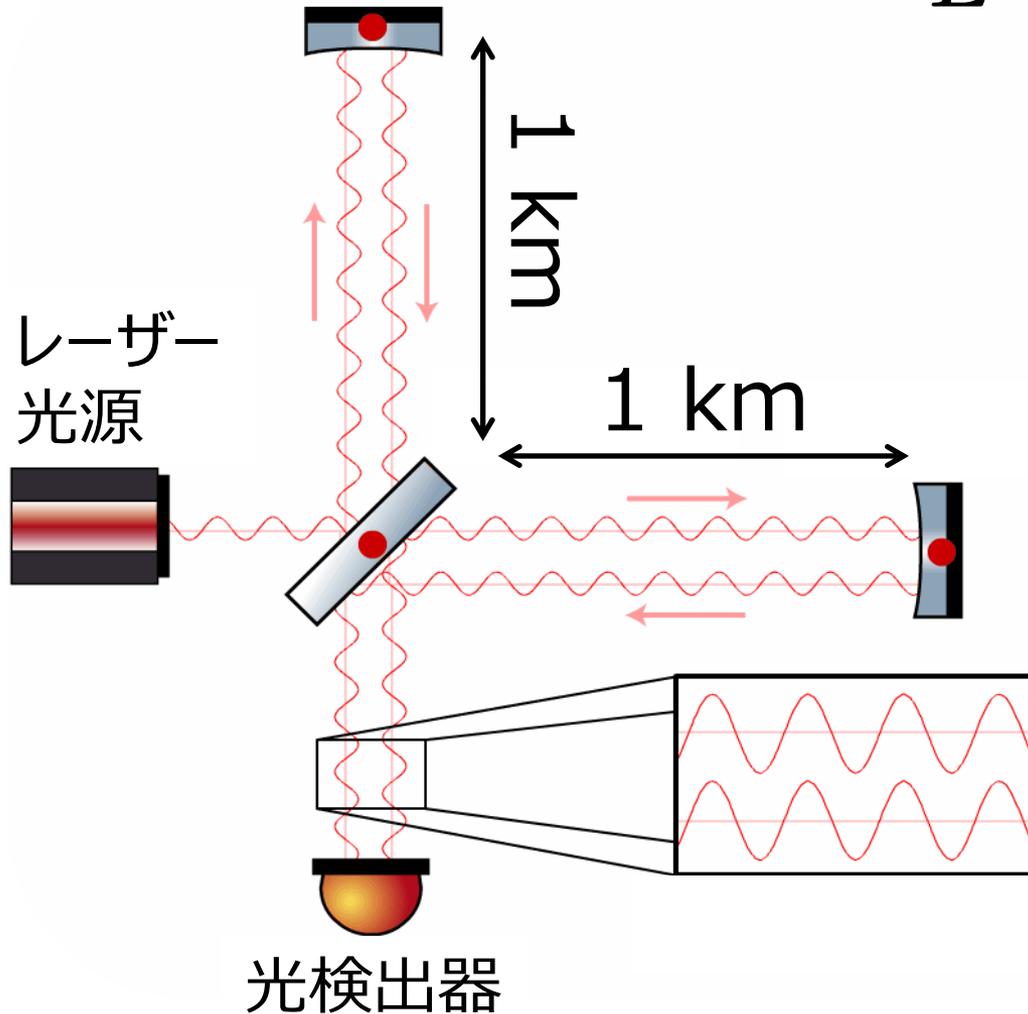
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 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？

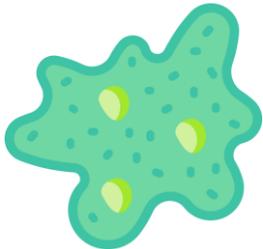
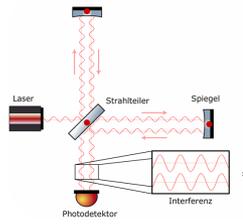
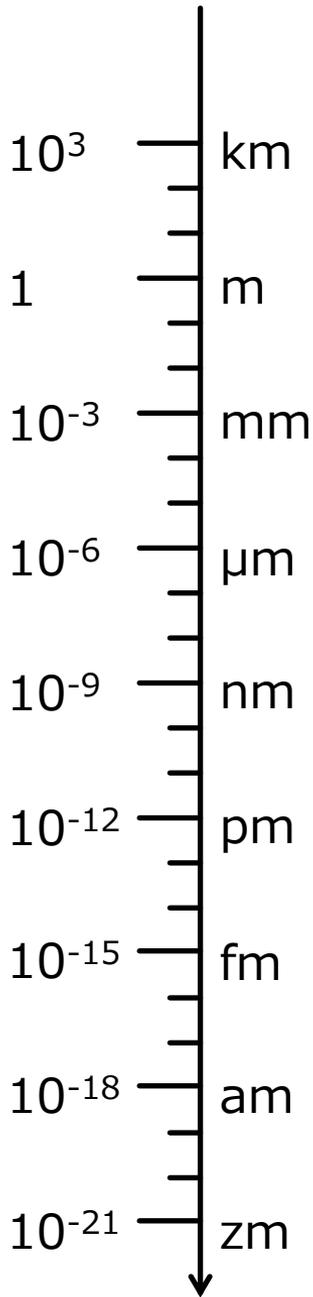
- 空間のひずみ量: $h = \frac{\delta L}{L} \sim 10^{-21}$



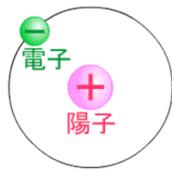
長いほど変化量は大きい
地上ではkm程度が限界

水素原子1個の
さらに1億分の1の変化
(10^{-18} m)
を測定しないといけない

様々な雑音との戦い

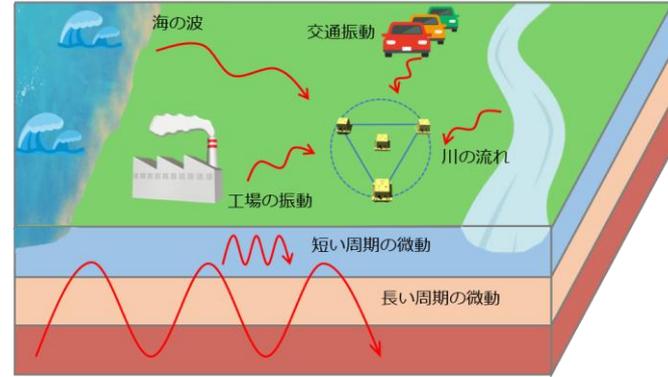


アメーバ $\sim 10^{-4}$ m

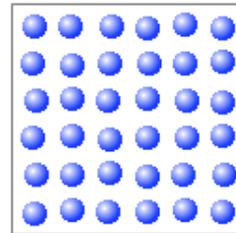


原子 $\sim 10^{-10}$ m

歪み
 10^{-21}



← 地面振動の大きさ
 $\sim 10^{-6}$ m

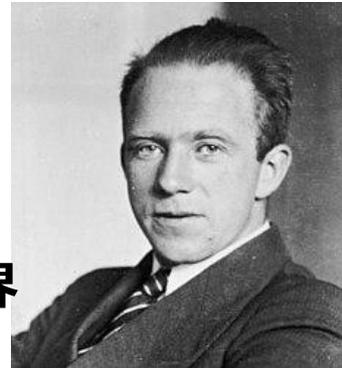


← 熱振動の大きさ
 $\sim 10^{-15}$ m

← レーザー干渉計の量子限界
 $\sim 10^{-20}$ m

目標感度

ハイゼンベルグの不確定性原理



重力波初検出までの歴史

- 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
アメリカ、イタリア、日本、ドイツ
→ 重力波は**見つからず**
- 2005年 連星ブラックホールの**重力波波形**が数値計算
できるようになってくる
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 LIGOが**初検出**

初検出を発表する
LIGO代表のライツィー



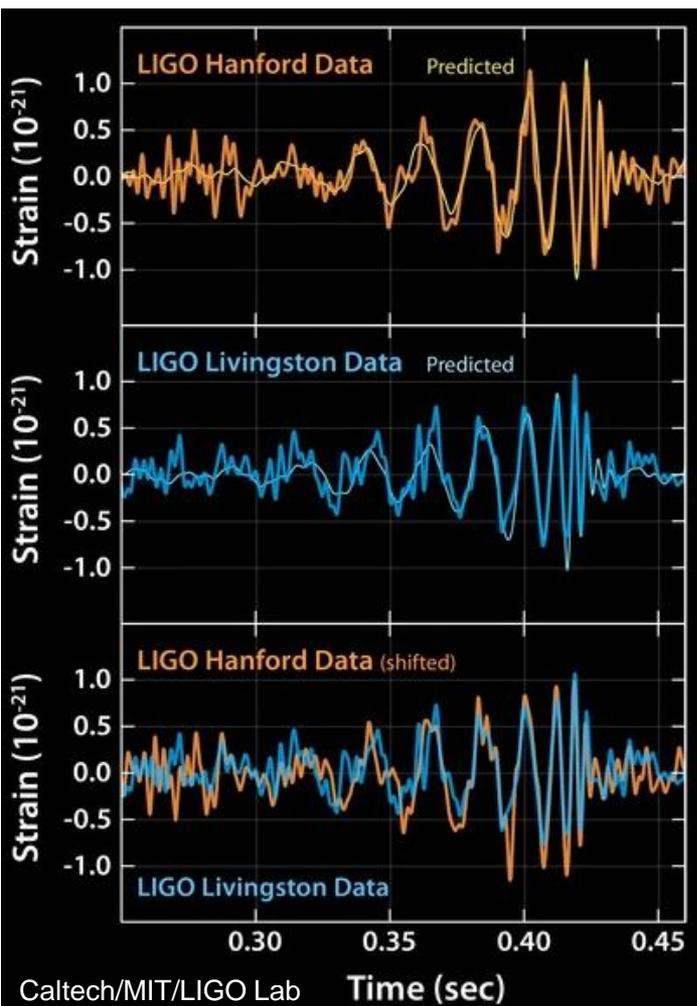
予言から100年

提案から50年

初検出論文の著者数は1004名

アメリカのLIGOによる初検出

- 2015年9月15日、3000 km離れた2台の望遠鏡で
ほぼ同時に同じ波形を検出 → **確実な**検出

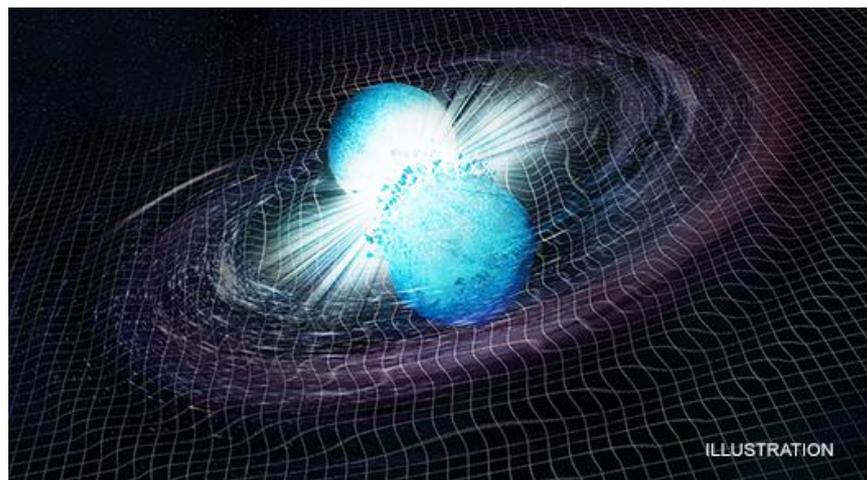
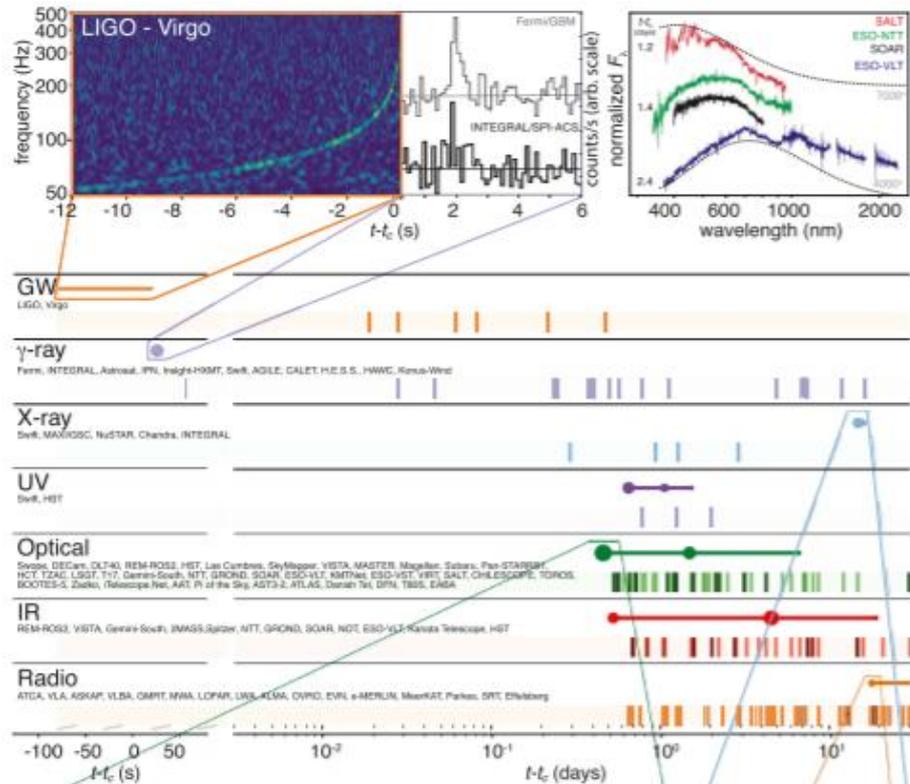


ハンフォード
観測所

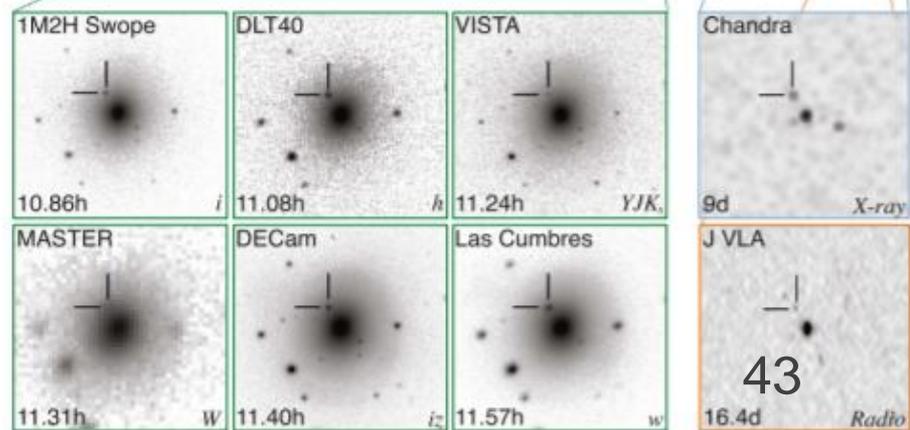


連星中性子星合体からの重力波

- 2017年8月17日に初検出
- ほぼ同時に
ガンマ線バーストを観測
その後も様々な
電磁波の波長で観測
- マルチメッセンジャー
天文学の幕開け



ApJL, 848:L12, (2017)



連星中性子星合体

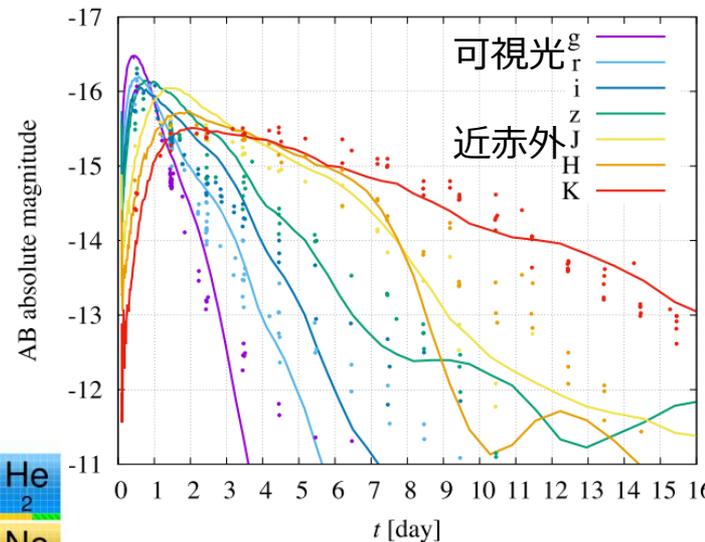
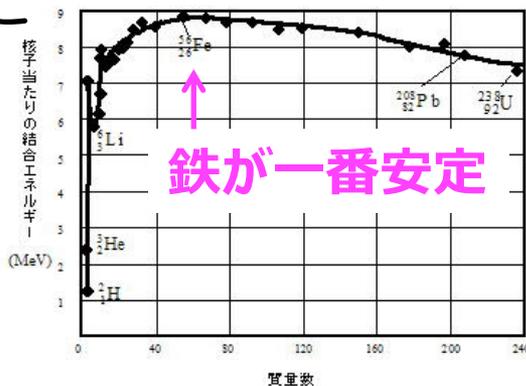
- 重力波のあと、ガンマ線を放出

<https://youtu.be/e7LcmWiclOs>

連星中性子星合体と重元素合成

- 合体後の光り方から、**重元素**が作られていることがわかった

D=40 Mpc, $20^\circ \leq \theta < 28^\circ$



K. Kawaguchi+,
[ApJL 865, L21 \(2018\)](#)

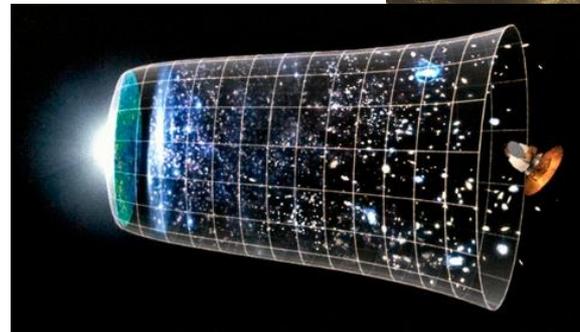
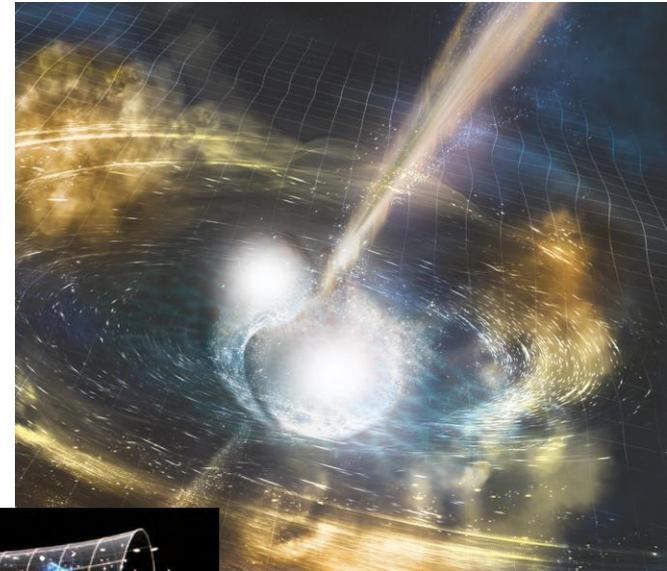
ビッグバンで作られる

H	He																	He
Li	Be																	Ne
Na	Mg																	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra																	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

← 連星中性子星合体で作られる

連星中性子星合体からわかったこと

- 連星中性子星合体で**ガンマ線バースト**が起こる
長年の謎であったショートガンマ線バーストの起源
 - 連星中性子星合体で**重元素**が合成される
全てを説明できるか？ 超新星爆発も寄与？
 - 重力波と光の**速度**は等しい
1.3億光年の距離を1.7秒の差
修正重力理論に大きな制限
 - **宇宙膨張**の速さ
(ハッブル定数)を測定
他の測定方法と無矛盾
- これまでに1例のみ
複数例の観測が必要

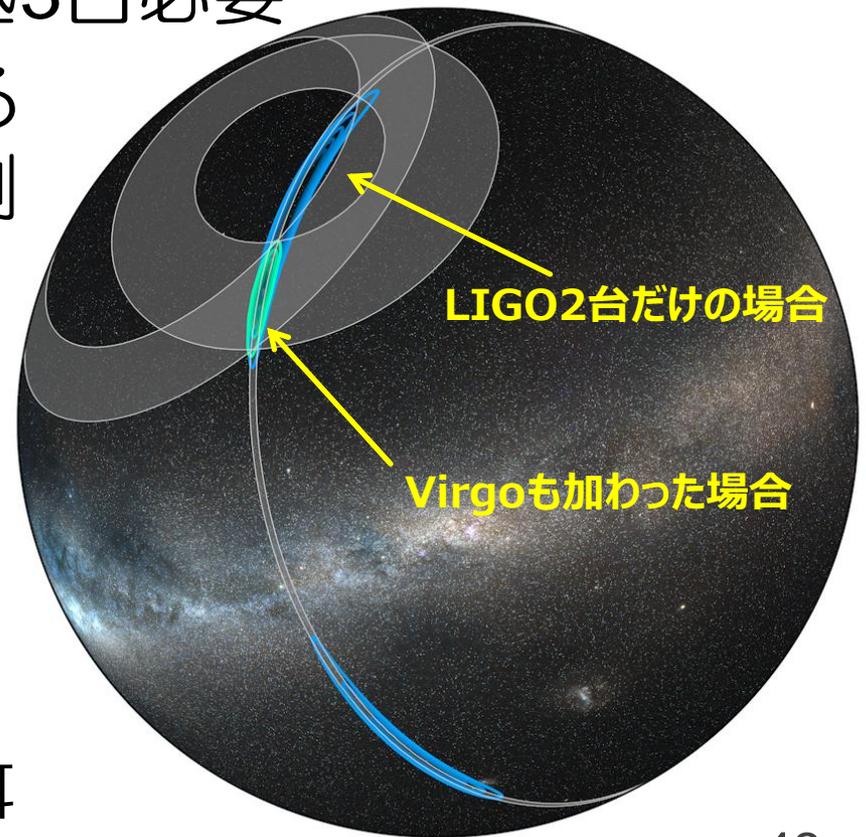
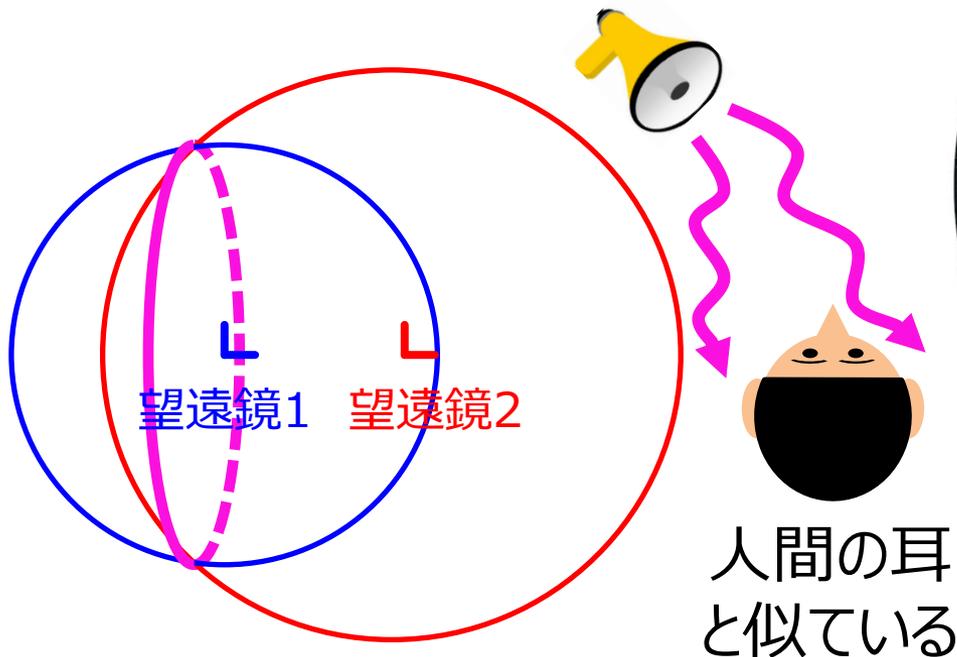


国際重力波観測ネットワーク



なぜ複数台が必要か？

- 1台だと他の雑音と区別をつけにくい
- 稼働率、全天カバー率の向上
- 波源の**方向決定**には最低3台必要
- 一般相対性理論を超える重力波**偏極モード**の観測



LIGO-Virgo-KAGRA共同観測協定

- 2019年10月に協定を締結



真貝寿明

ブラックホール・
膨張宇宙・重力波
— 一般相対性理論の100年と展開



アインシュタインの想像を超えた世界とは?
現代物理学の最先端

- ブラックホールは「特異点」を隠すのか —
- 「ダークエネルギー」をどう解釈するか —
- 「重力波の直接検出」は可能か —

今日の主流研究テーマを読む

大型低温重力波望遠鏡KAGRA

- 2010年にプロジェクトスタート
- 愛称: かぐら(神岡 + gravitational wave)
- 岐阜県の神岡鉱山**地下**に建設
- **地下建設と低温が大きな特徴**
- 14ヶ国、~130研究機関、~420名



プロジェクト代表:
梶田隆章

KAGRA



2024年12月の
コラボレーション会議

KAGRAの行き方



東京から新幹線で最速2時間5分



KAGRA

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

富山駅から
電車+バスで約2時間
(車で約1時間)



神岡の風景

2024年12月



2015年6月



東京大学国際高等研究所
カブリ数物連携宇宙研究機構
神岡分室

東北大学
ニュートリノ科学
研究センター
茂住実験室

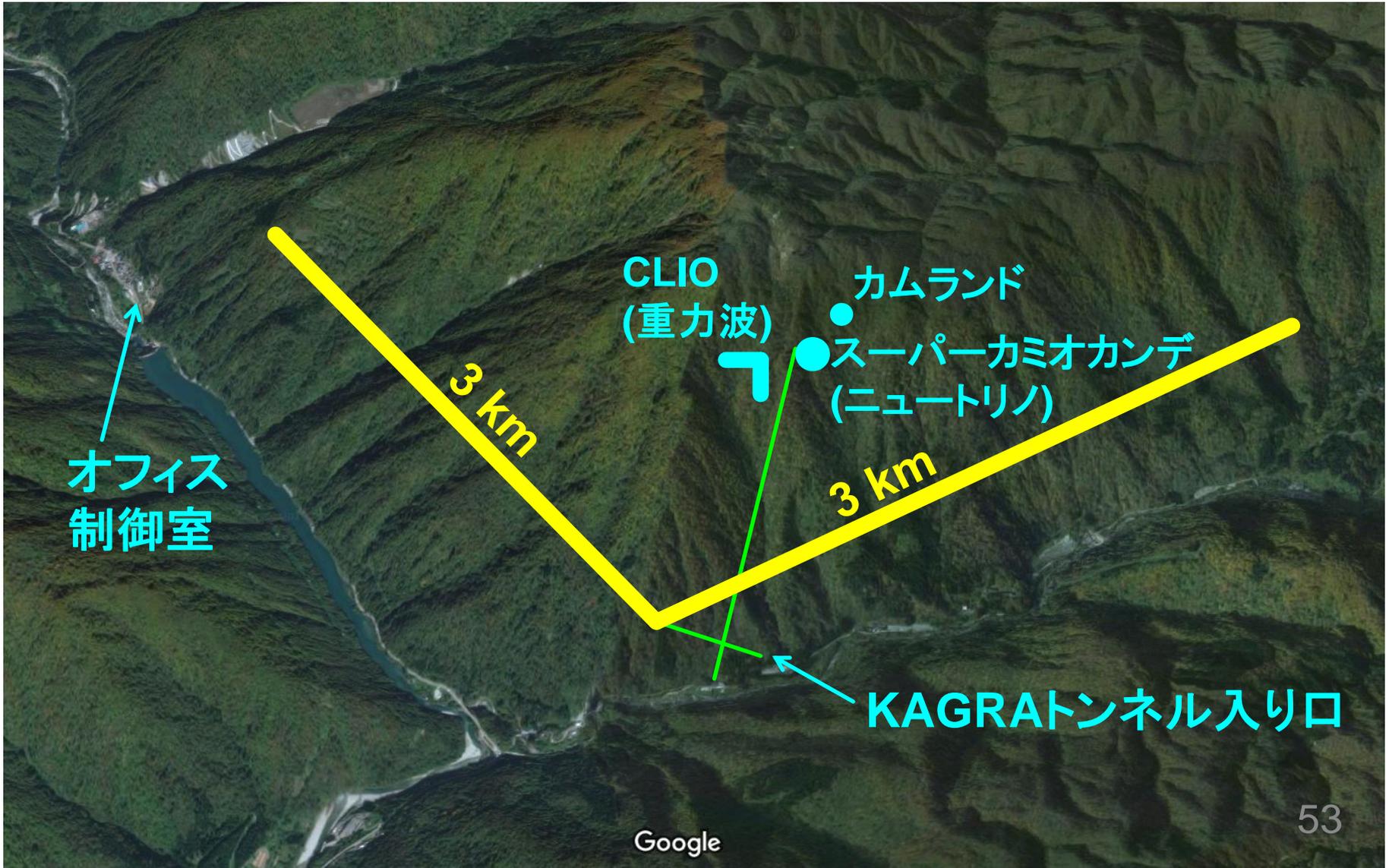
東京大学宇宙線研究所
附属神岡宇宙素粒子研究施設

東京大学宇宙線研究所
重力波観測研究施設

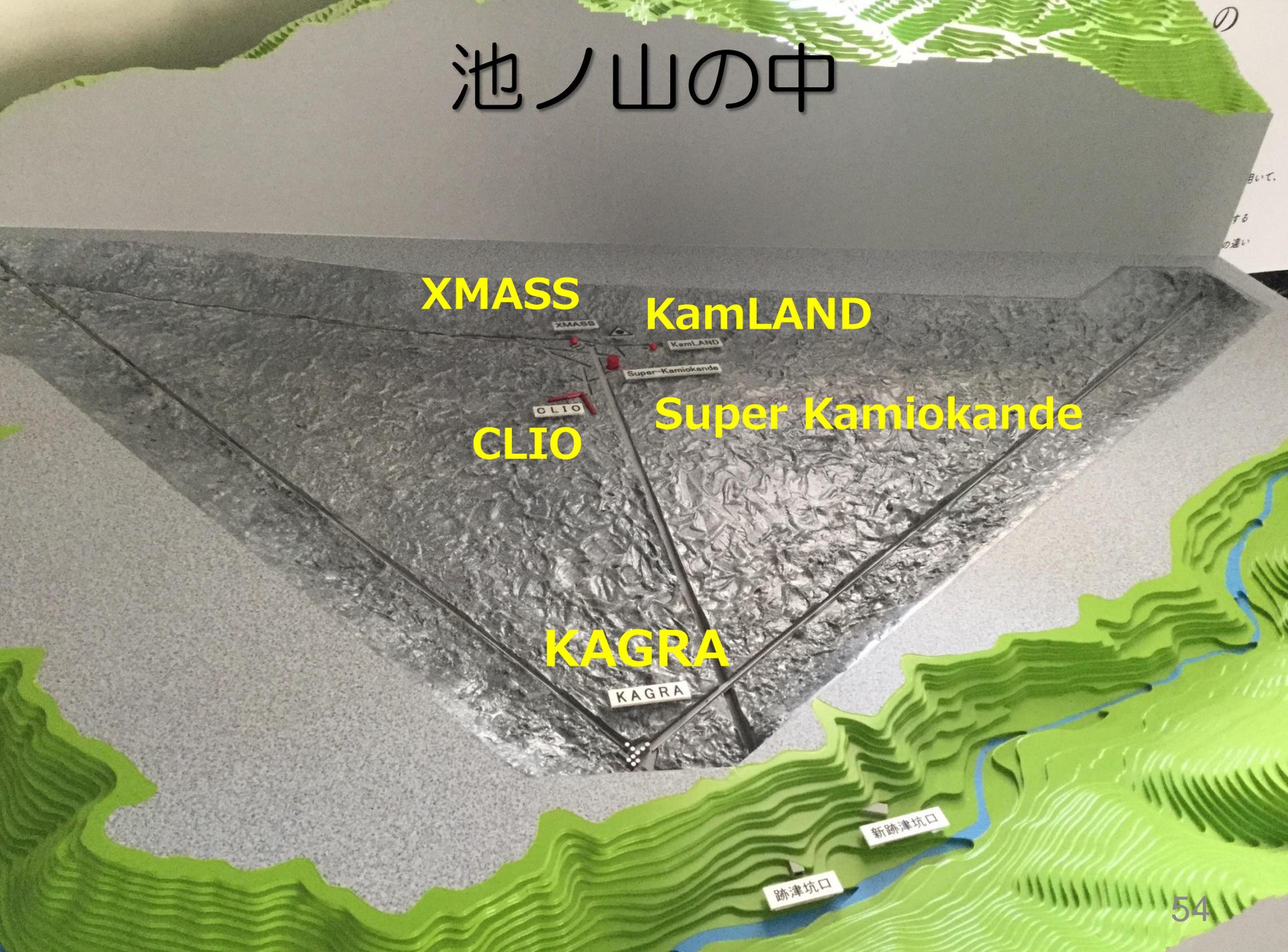


KAGRAの所在地

- 岐阜県飛騨市 池ノ山の中にある



池ノ山の中



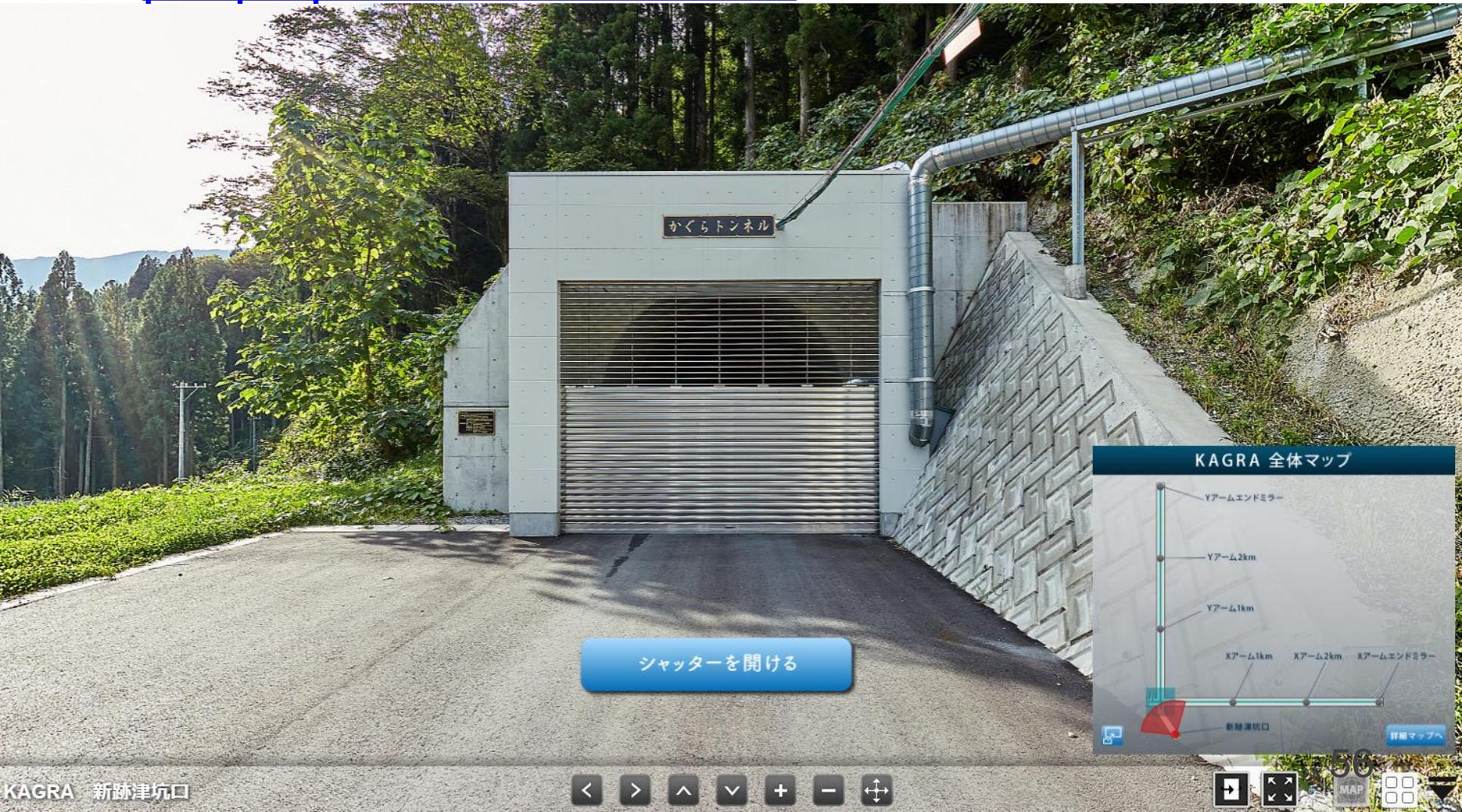
かぐらトンネル

- 2本の3km真空パイプの中をレーザー光が往復



宇宙線研究所VR

- <https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/prwps/panorama/KAGRA/>



地下での作業

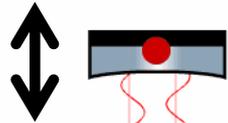
- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



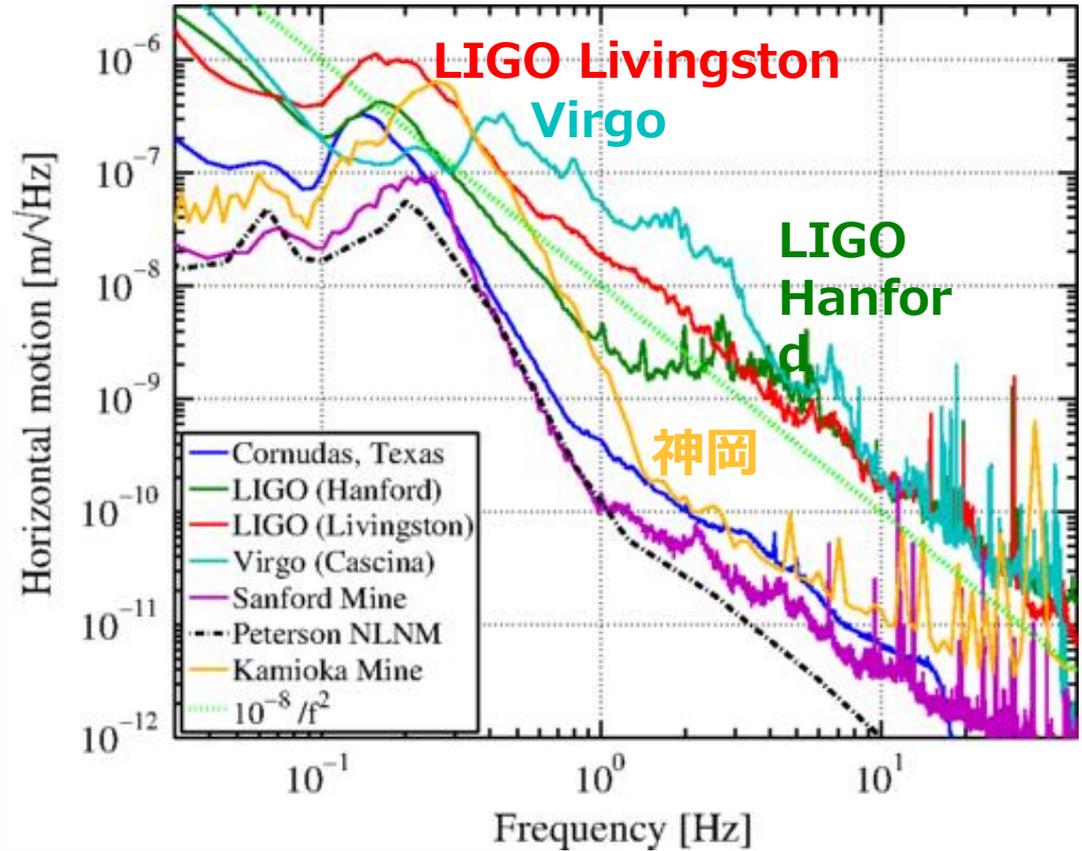
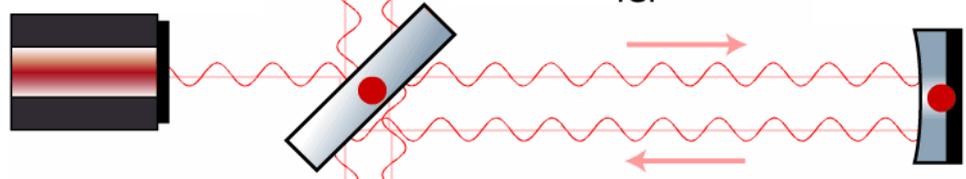
地下建設で地面の揺れを低減

- 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

地面振動



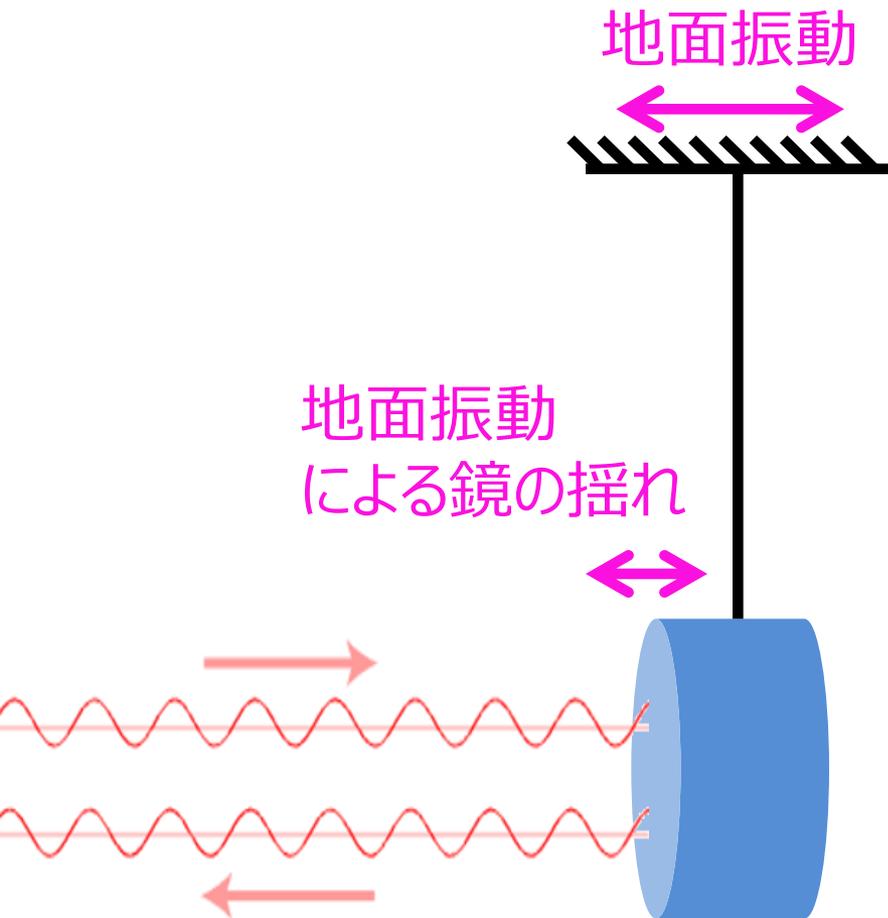
レーザー光源



R. X. Adhikari, [Rev. Mod. Phys. 86, 121 \(2014\)](#)

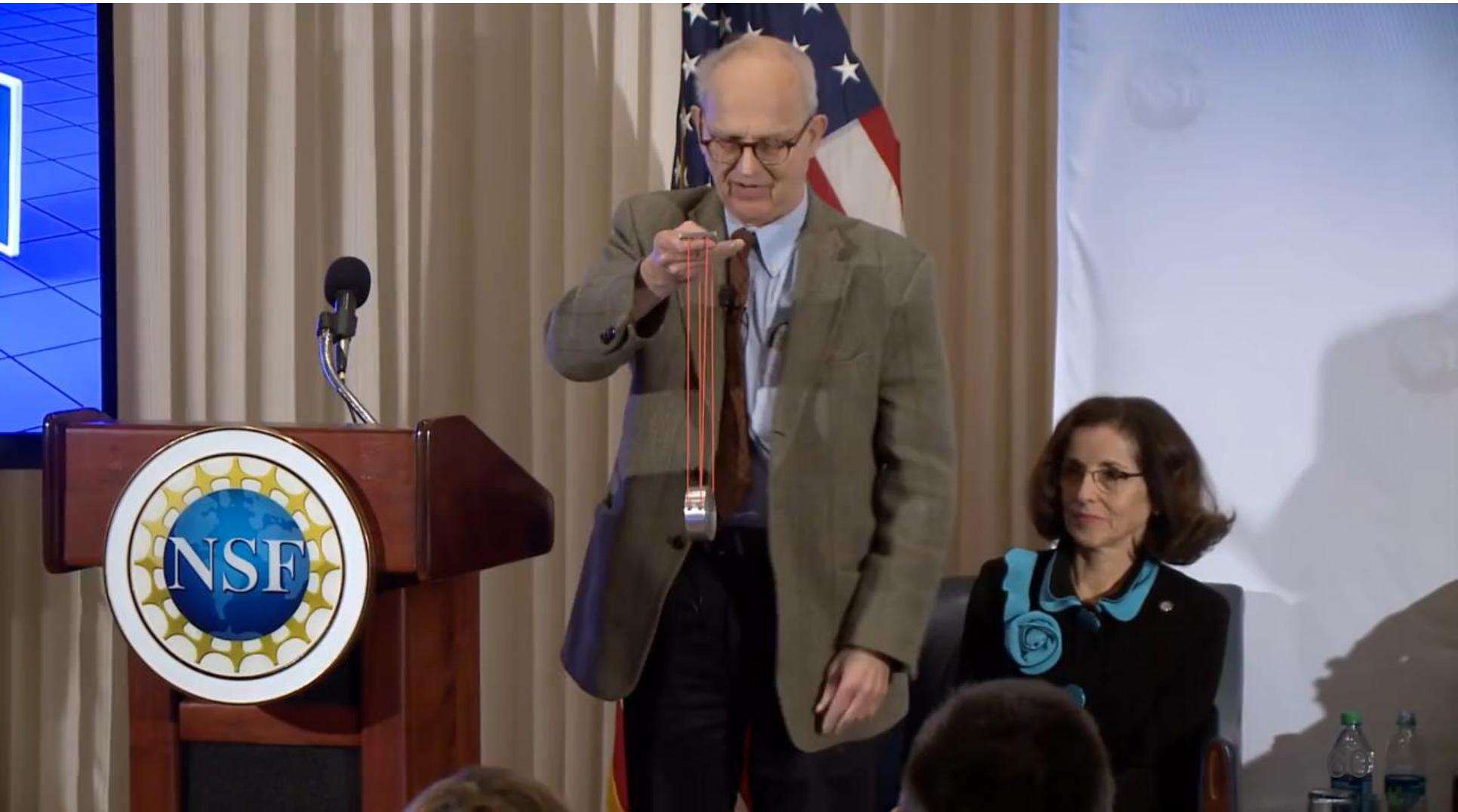
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



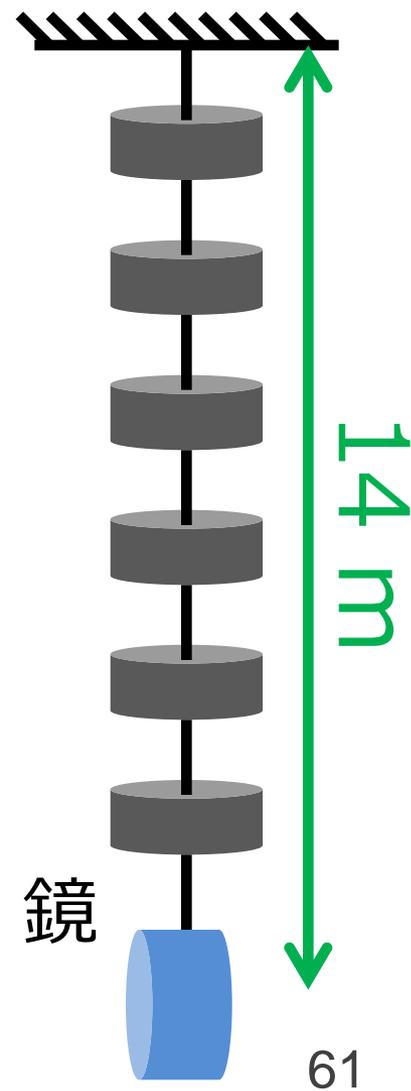
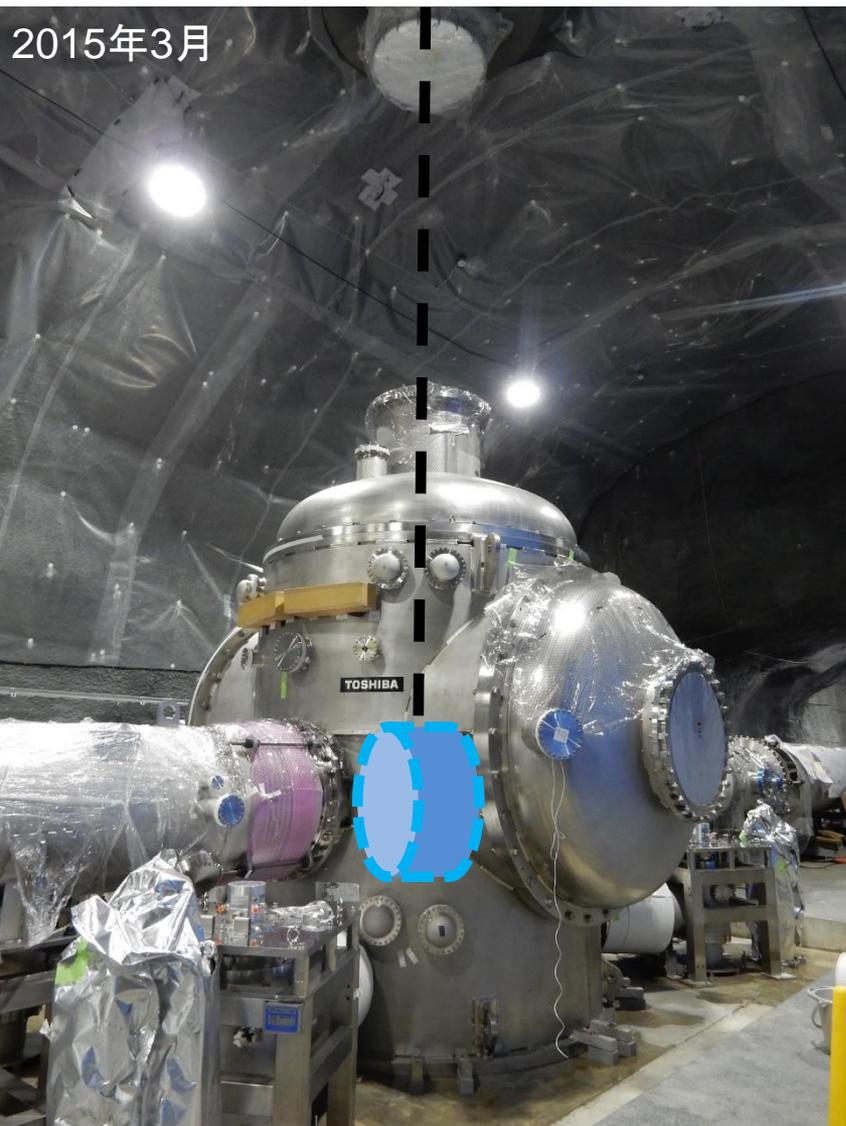
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



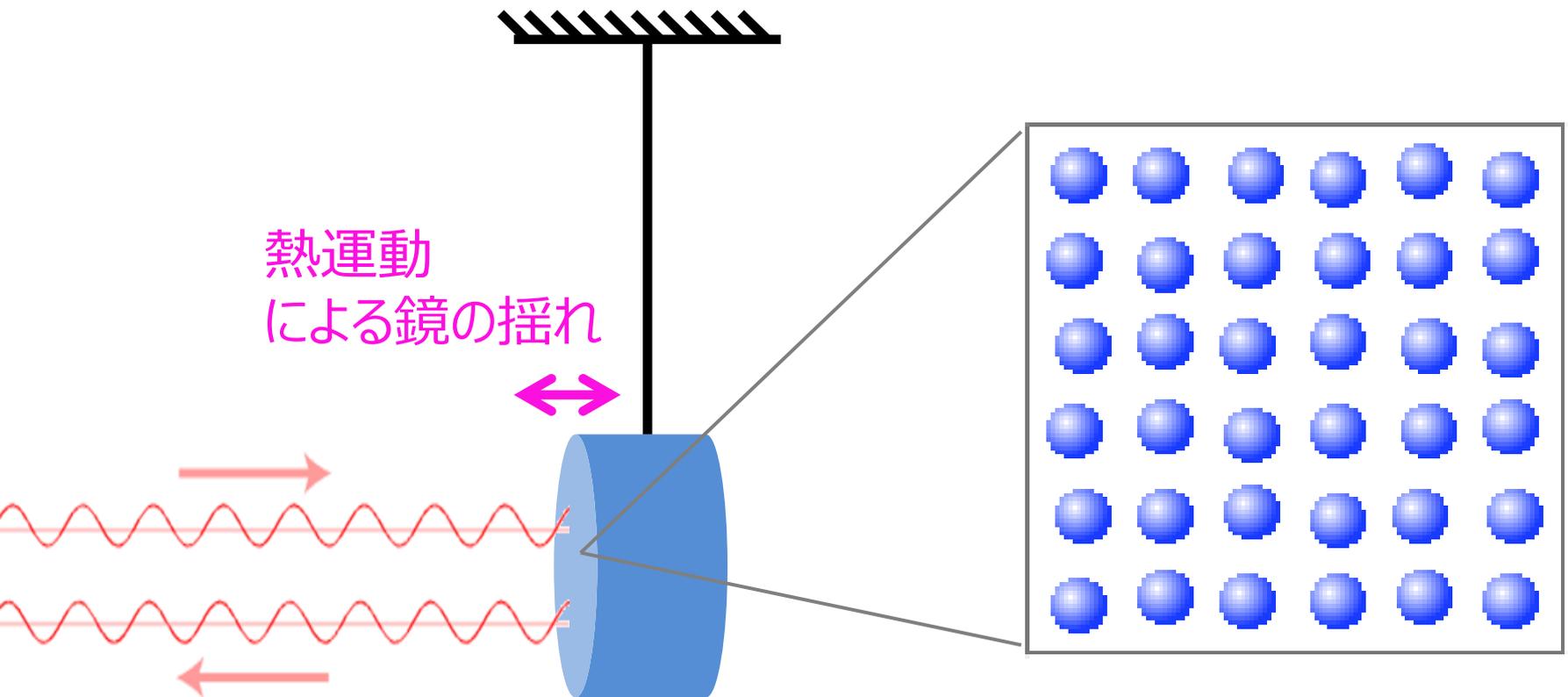
KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

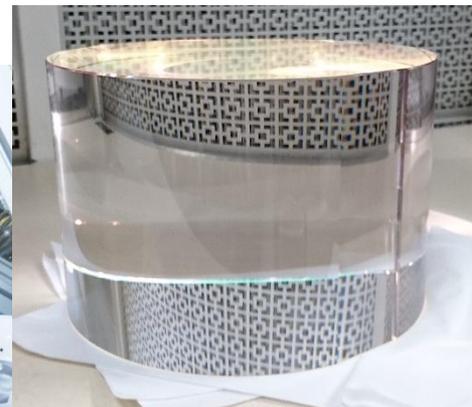
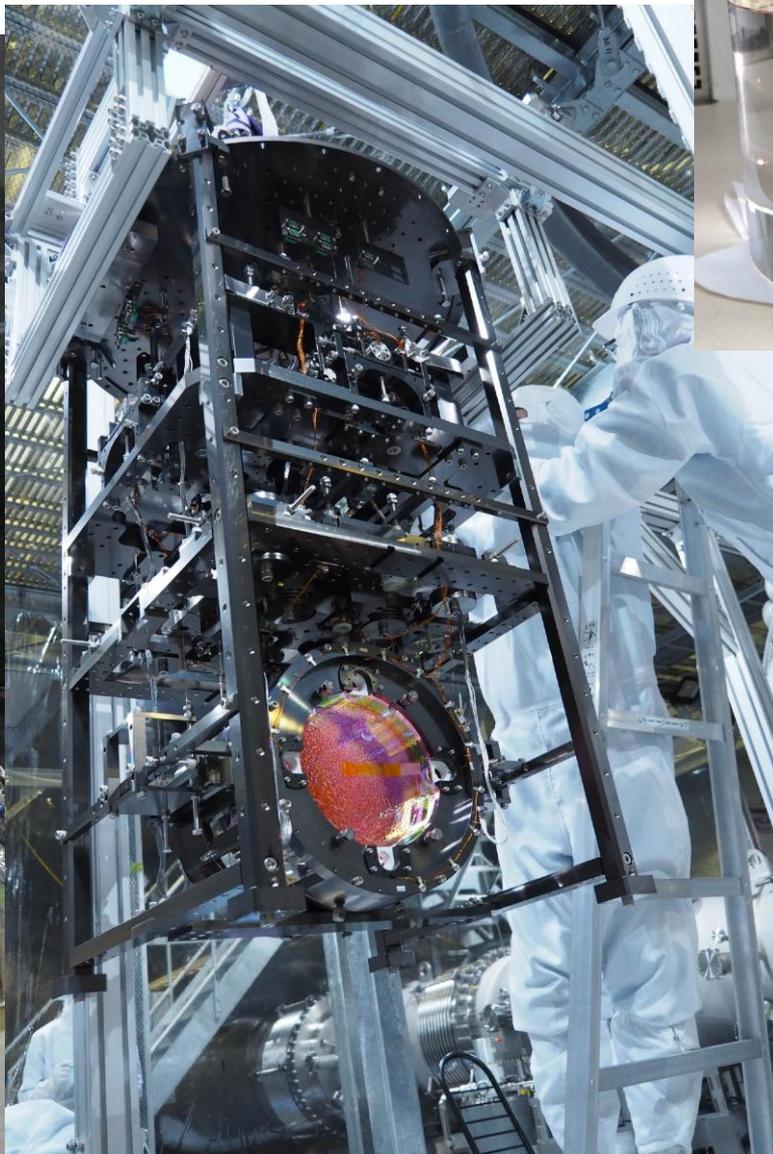
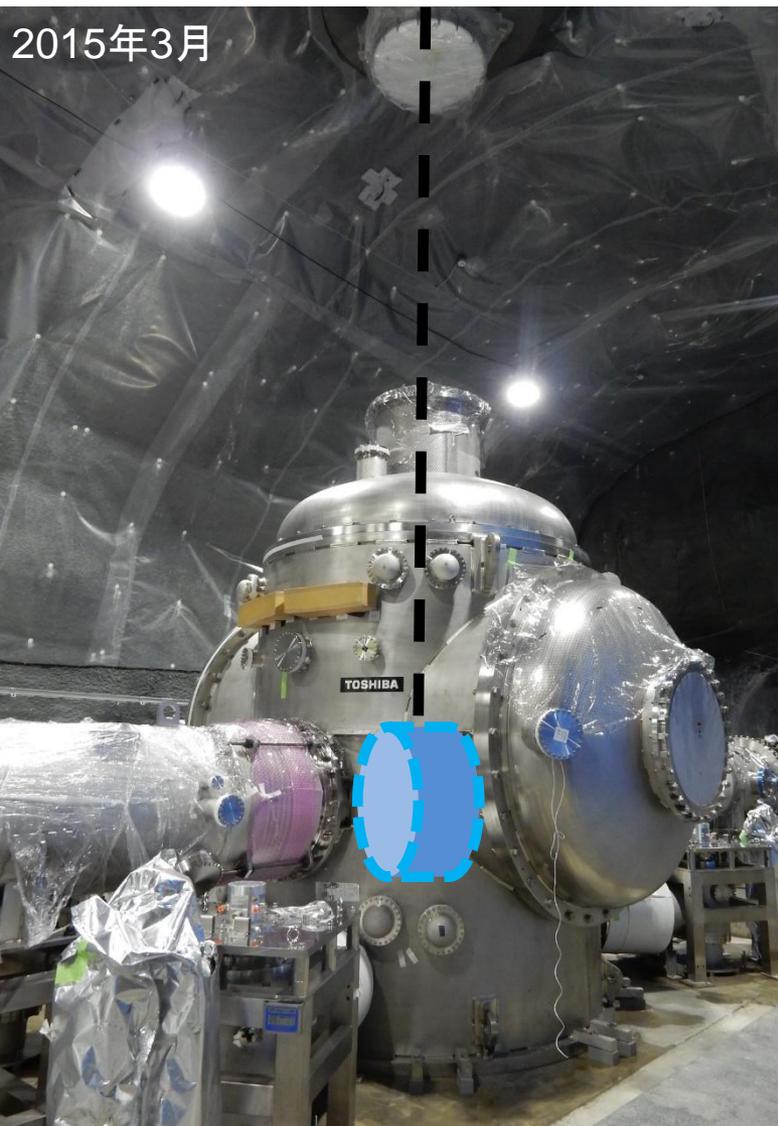


鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 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



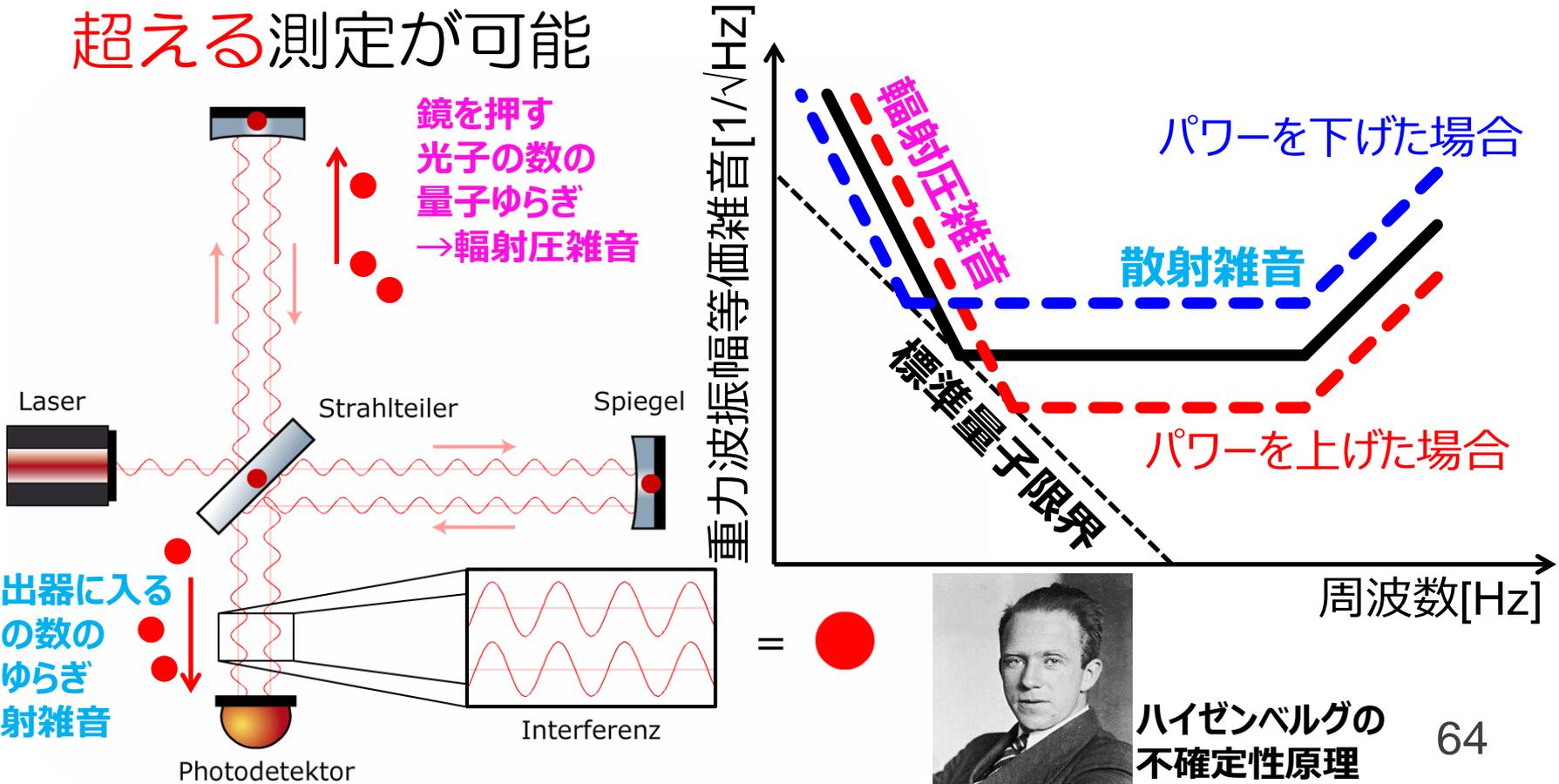
KAGRAの低温懸架装置



サファイア鏡
直径 22 cm
厚さ 15 cm

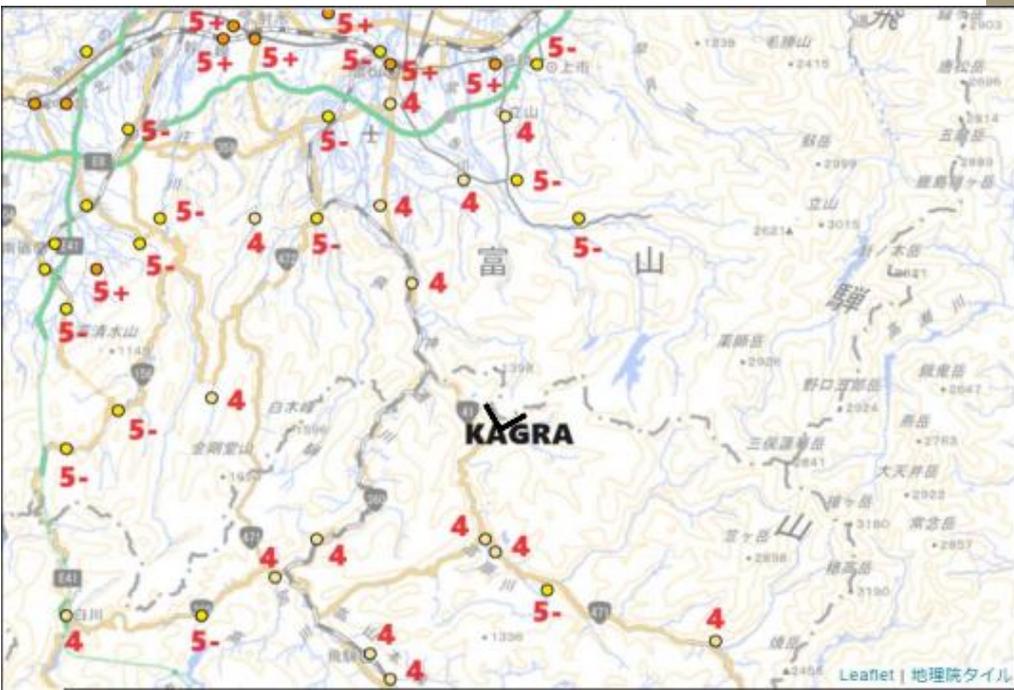
量子非破壊計測

- レーザー光が強いほど、散射雑音は小さい
- レーザー光が弱いほど、輻射圧雑音は小さい
- 量子的な相関を利用することで、標準量子限界を **超える** 測定が可能



KAGRAの現状

- 2024年1月1日の能登半島地震(M7.6)で鏡の懸架装置などが損傷(坑内は震度3)
- 現在復旧作業中(ほぼ被災前の状態に回復)
- 2025年6月までに感度を約10倍にして観測再開、重力波信号の初検出を目指す

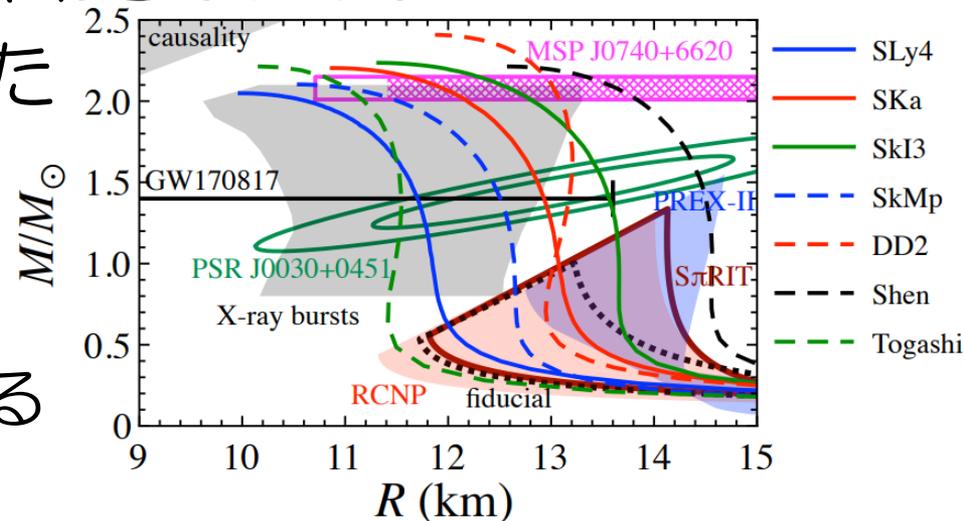


A collage of posters and notices related to KAGRA. The posters include:

- 観測再開祈願 KAGRA**: A poster with the KAGRA logo and text about the restart of observations.
- 祈完全復活! 世界に羽ばたけ!**: A poster with the text '祈完全復活! 世界に羽ばたけ!' and 'よみがえれ KAGRAの鼓動'.
- 観測再開祈願**: A poster with the text '観測再開祈願' and '観測再開祈願応援メッセージ'.
- 飛騨市民から研究者の皆様へ**: A poster with the text '飛騨市民から研究者の皆様へ' and '観測再開祈願応援メッセージ'.
- 地震に負けるな! KAGRA 復活の日を皆で待っている**: A poster with the text '地震に負けるな! KAGRA 復活の日を皆で待っている'.
- 頑張りましょう KAGRA! さらなる進化を遂げた復活を!!**: A poster with the text '頑張りましょう KAGRA! さらなる進化を遂げた復活を!!'.

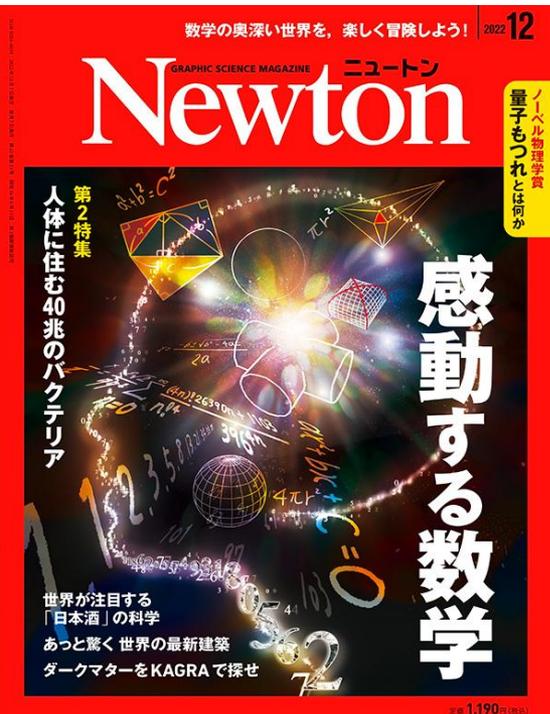
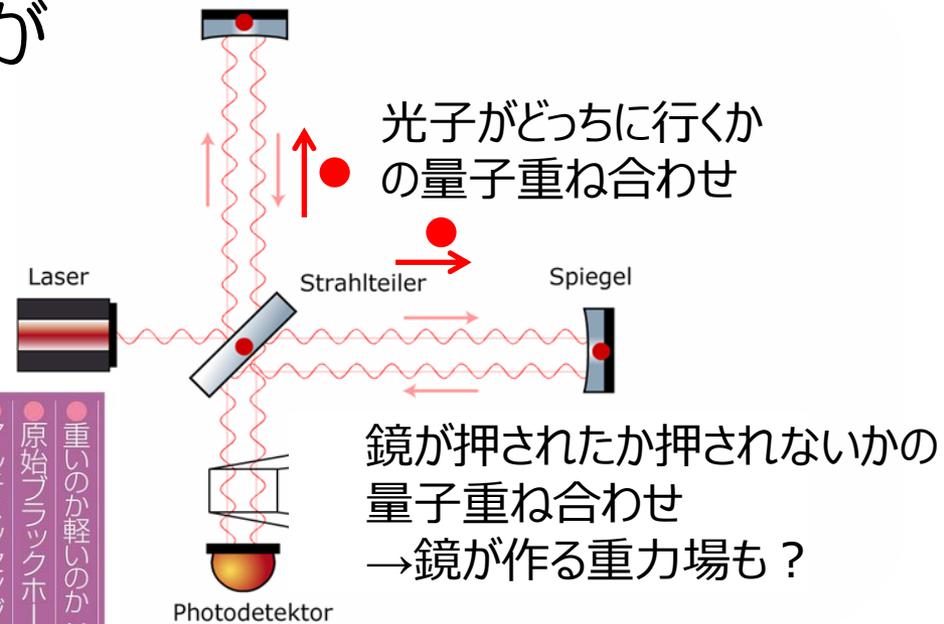
KAGRAのこれから

- 重力波をLIGO、Virgoとともに複数台で観測することで、重力波の**到来方向を特定**し、光学望遠鏡とマルチメッセンジャー観測を行う
- 中性子星の**状態方程式**
 - 連星中性子星は合体後に中性子星になるのか、ブラックホールになるのか
 - 中性子星は硬いのか、やわらかいのか
- 一般相対性理論を超えた**新しい重力理論**の検証
 - ブラックホールの準固有振動
 - 一般相対性理論を超える重力波の偏極モード



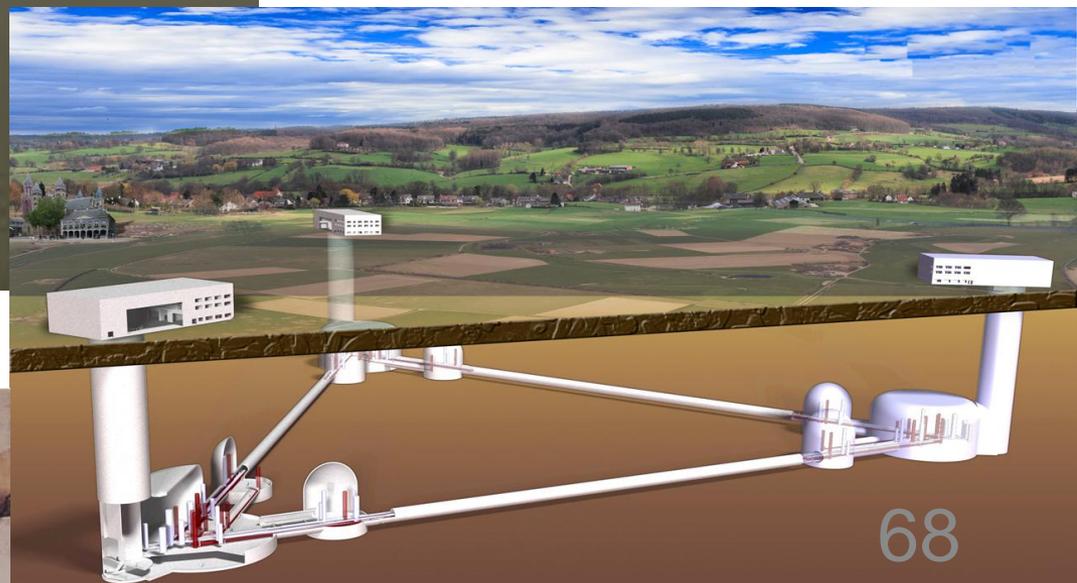
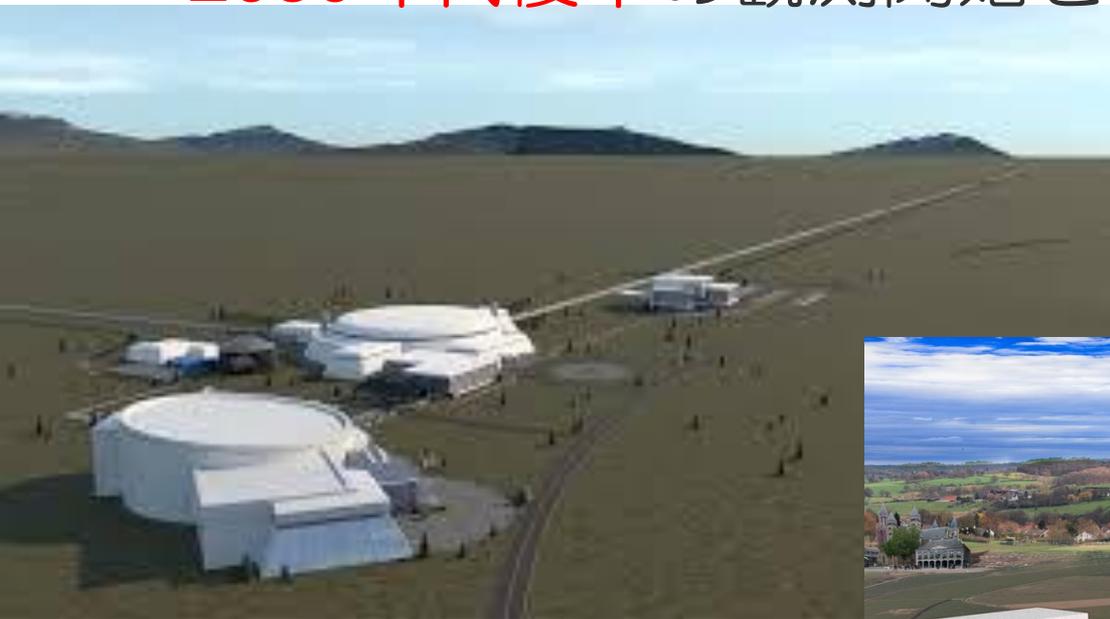
KAGRAのこれから

- 低温を活かし、量子限界を超えた感度を実現
- シュレディンガーの猫が実現できるかも？
- ダークマター探索も



次世代重力波望遠鏡計画

- 欧米では**10~40 km**の次世代計画が進行中
- 現行のLIGOやVirgoに比べて感度約10倍
- **2030年代後半**の観測開始を目指している

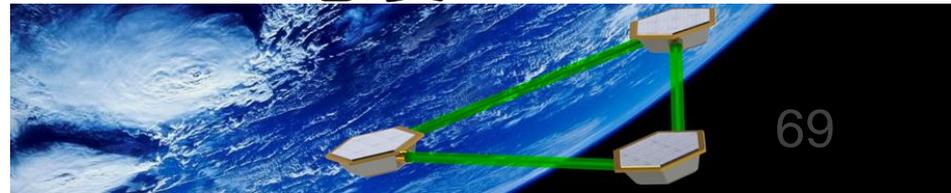
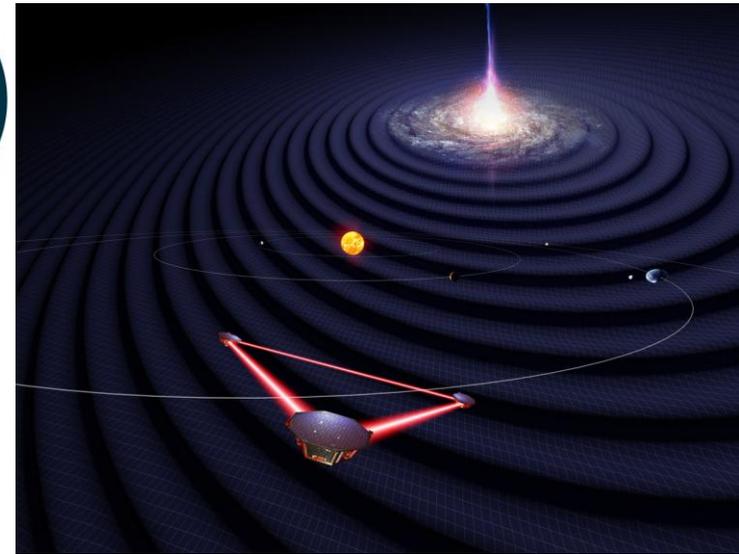


宇宙重力波望遠鏡計画

- 地上ではレーザー干渉計の大きさは数10 kmが**限界**
 - また、**地面振動**から10 Hz以下の感度向上が困難
- 宇宙重力波望遠鏡

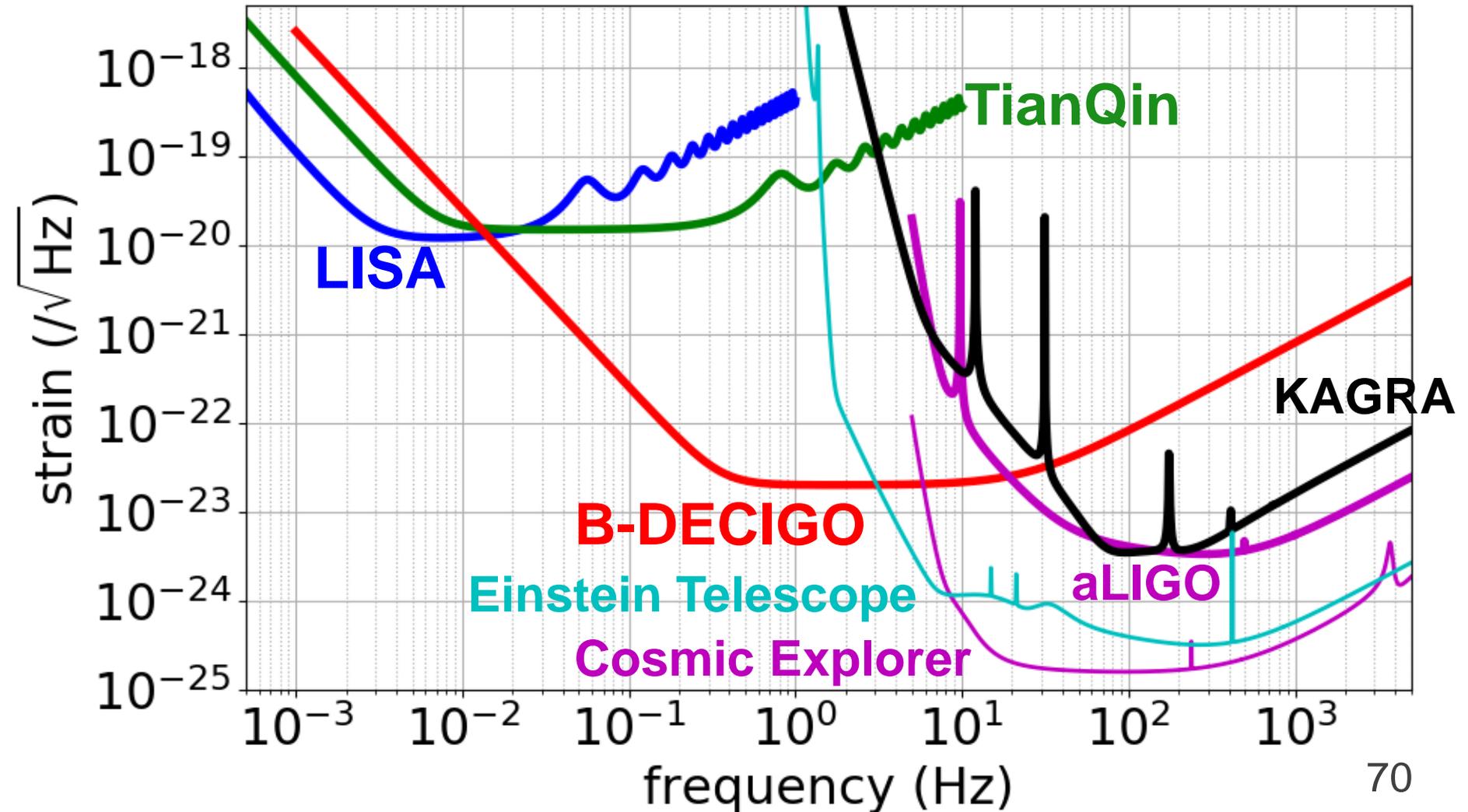


- LISA(りさ): 1-10 mHzに感度
 - ヨーロッパ主導
 - **2030年代中盤**に打ち上げ予定
 - 2016年にはLISA Pathfinderでの**実証実験に成功**
 - 中国にも同様の計画: **TianQin** (天琴), **Taiji** (太極)
- DECIGO(でさいご): 0.1-10 Hzに感度
 - 日本、2030年代目指す

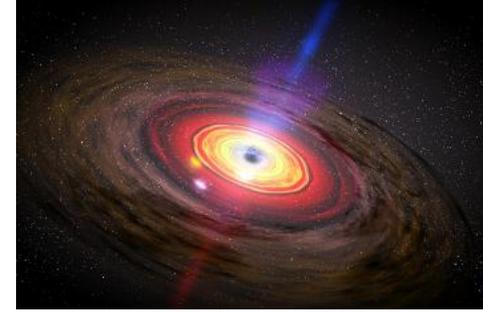


地上と宇宙の感度の比較

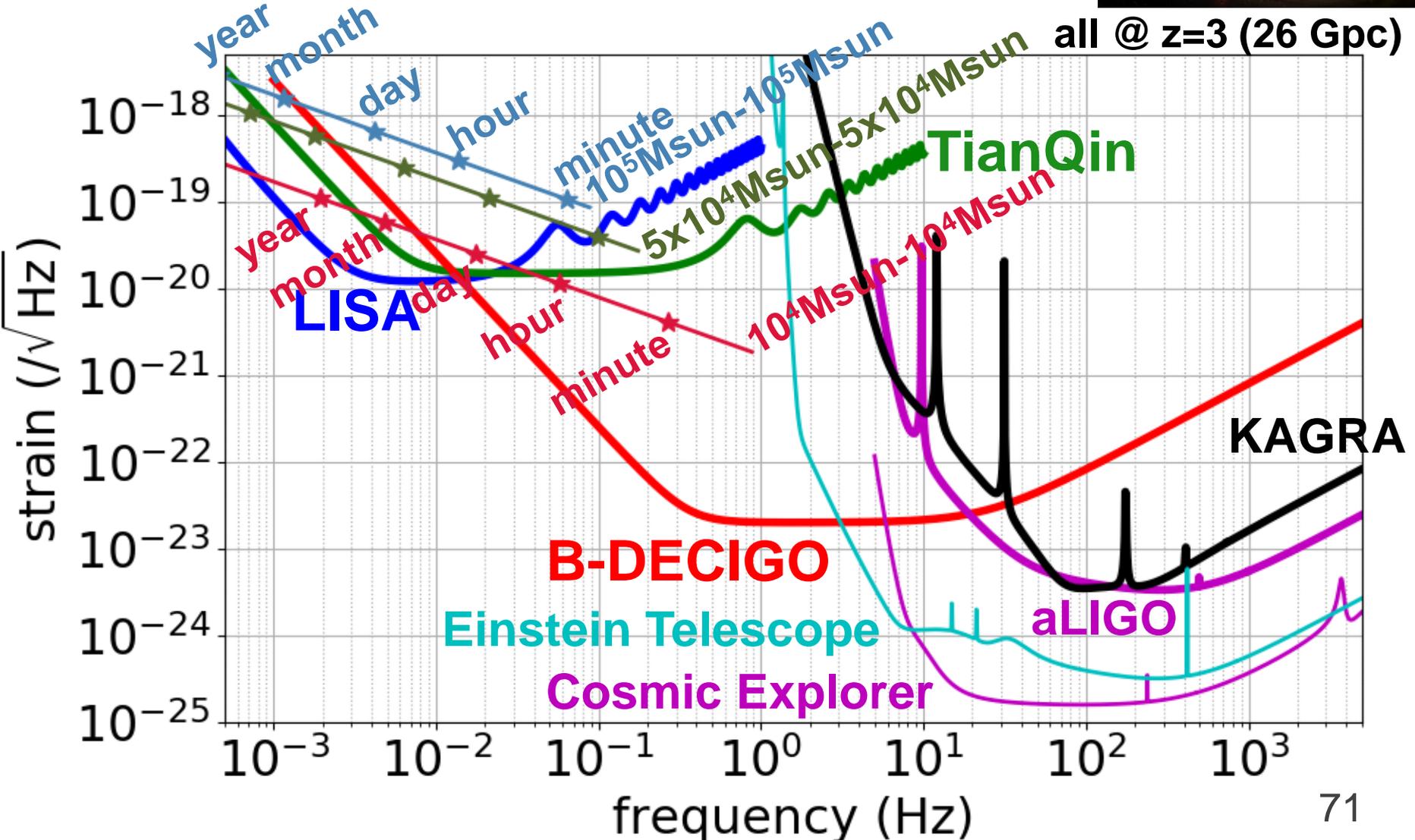
- 宇宙では地上に比べて低周波数帯に感度を持つ



超大質量ブラックホール

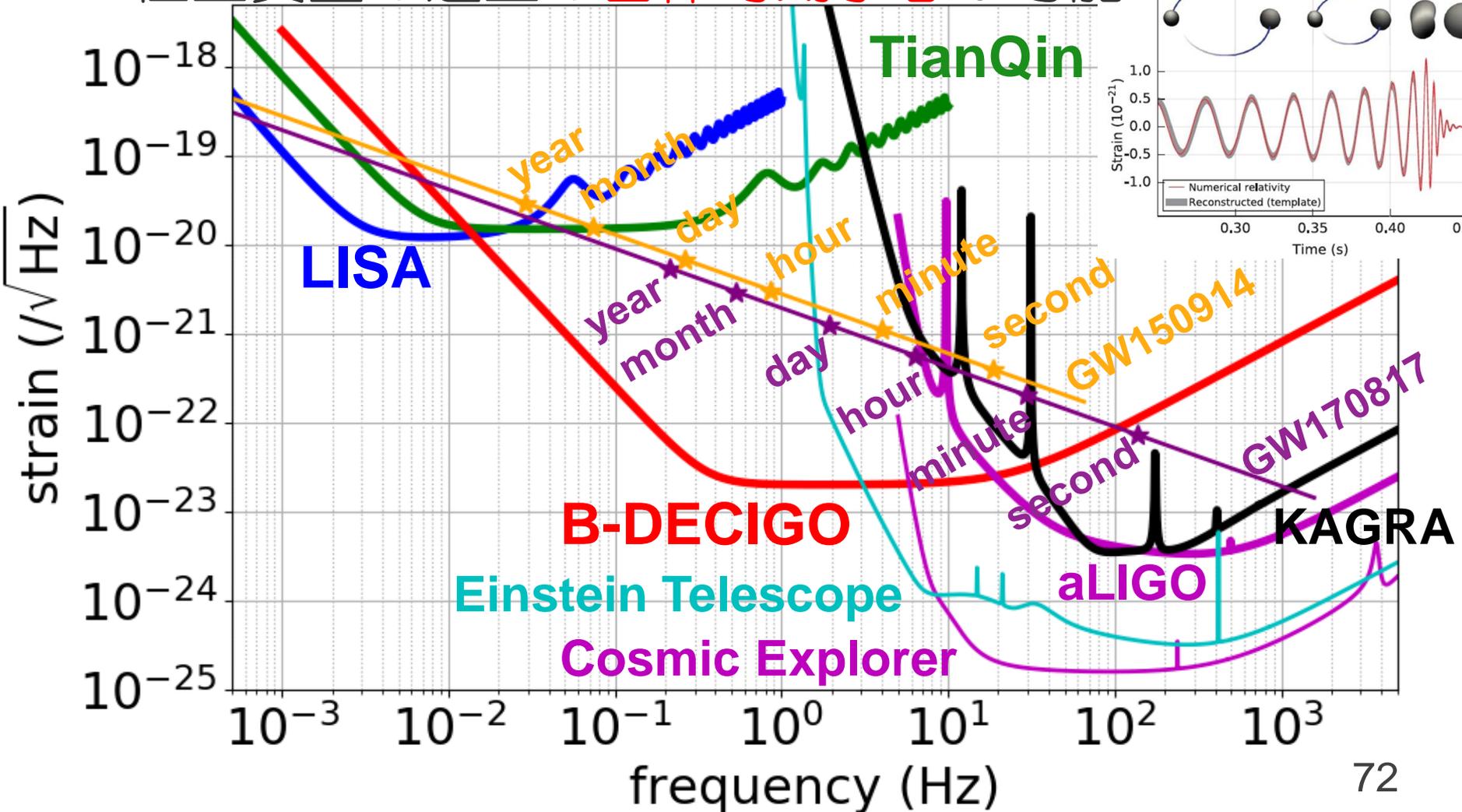
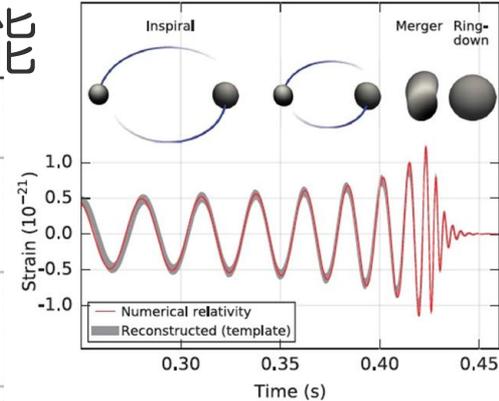


- LISAが得意



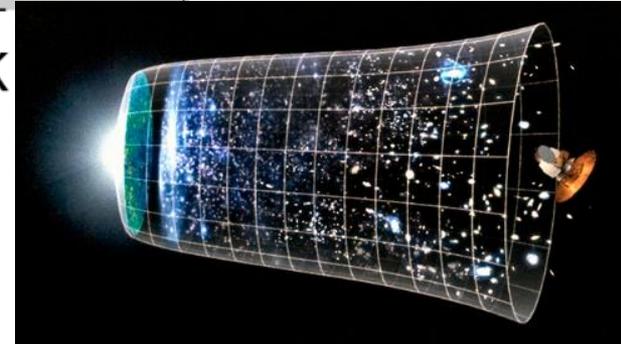
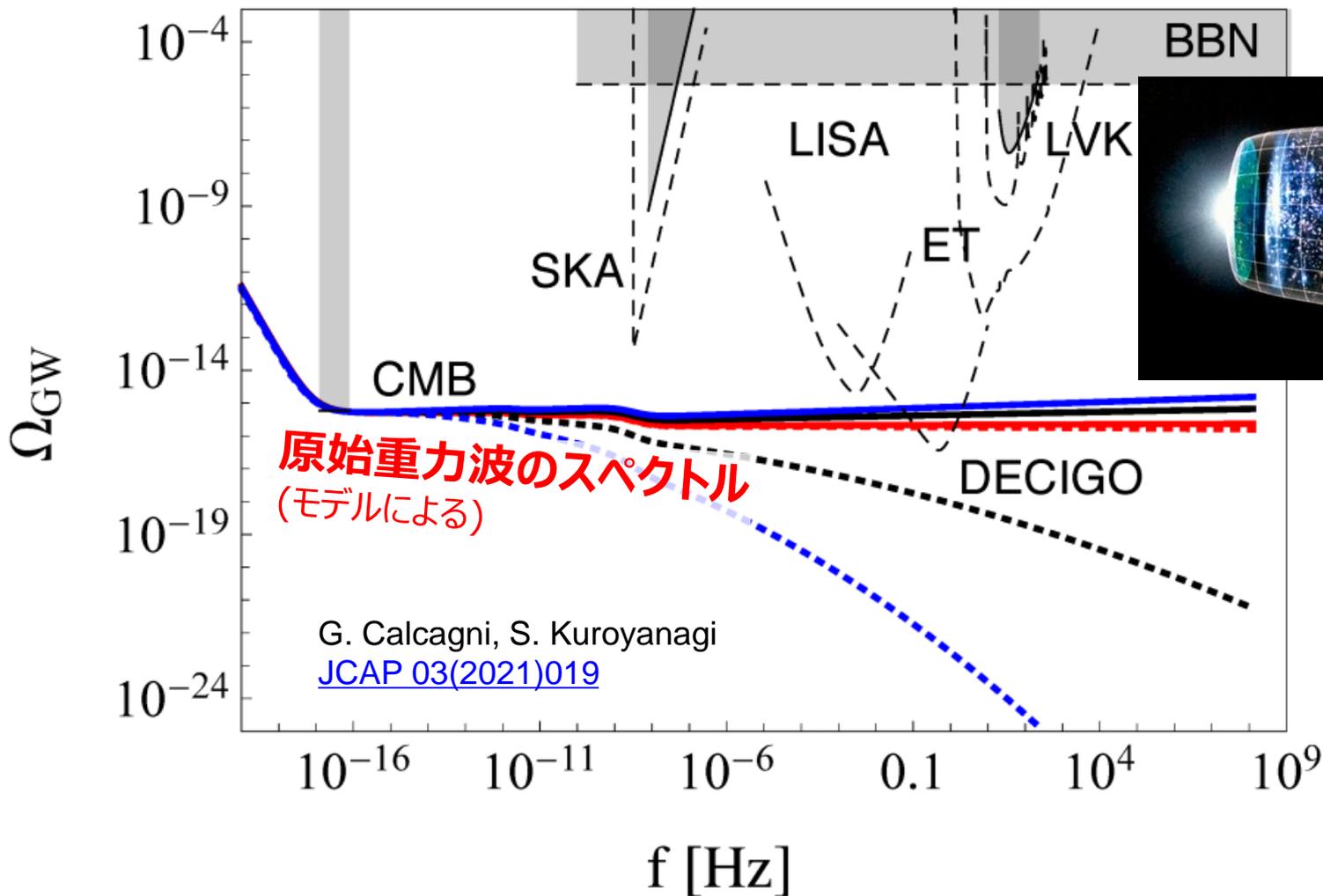
多波長重力波観測

- DECIGOにより中間質量ブラックホールの合体や恒星質量の連星の合体時刻予想が可能



インフレーション起源の原始重力波

- DECIGO帯が最適
- インフレーションのメカニズムに迫る



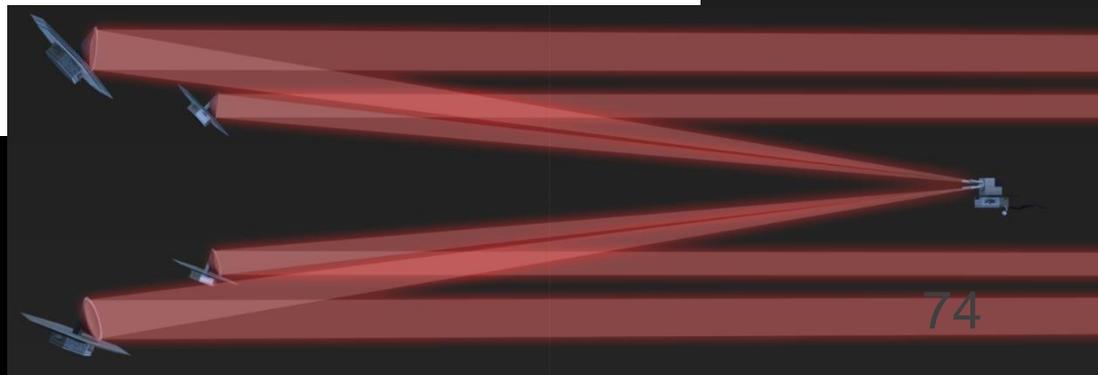
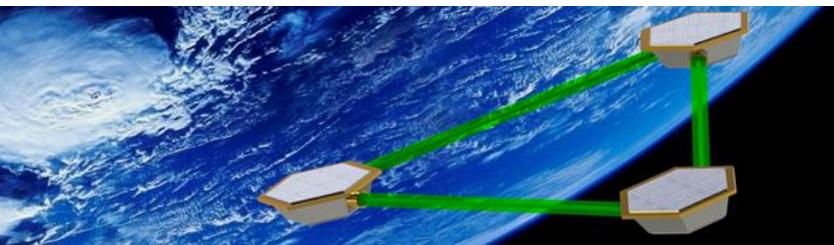
SILVIA計画



- Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications
- サブミクロン級の超精密編隊飛行技術を実証
- DECIGOや赤外線干渉計LIFEにつながる
- 2020年2月にJAXAに提案
現在ミッション定義フェーズ

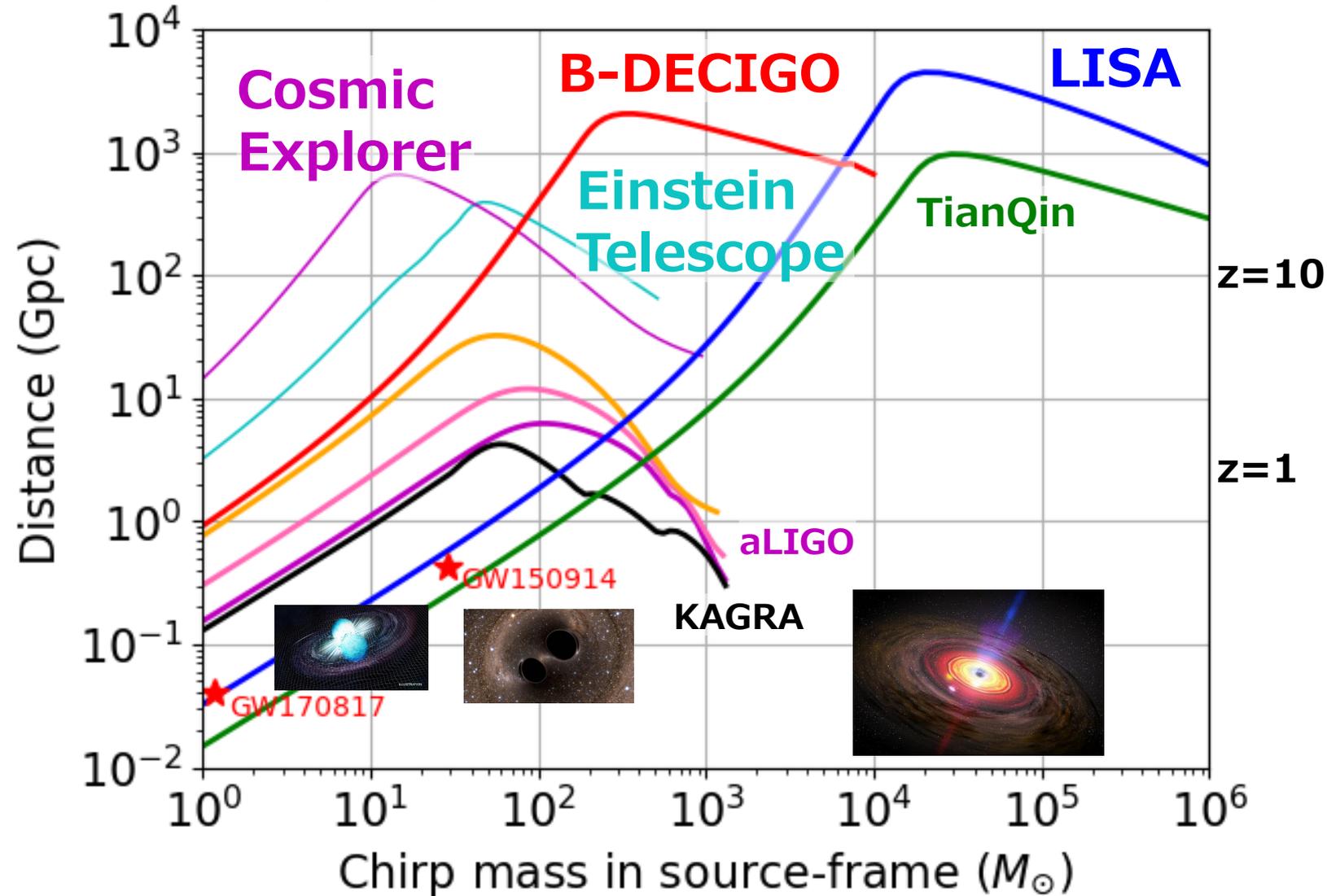


⇒ LIFE

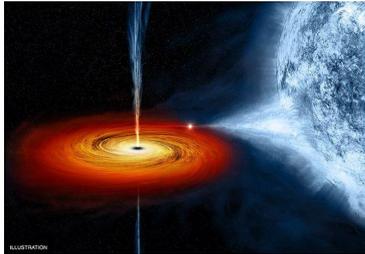


連星合体の検出可能距離

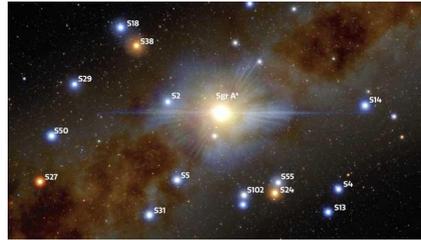
- 2030年代後半には全宇宙の連星合体の観測へ



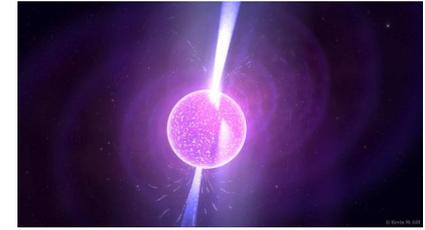
電磁波のスペクトルと天文学



ブラックホールの発見

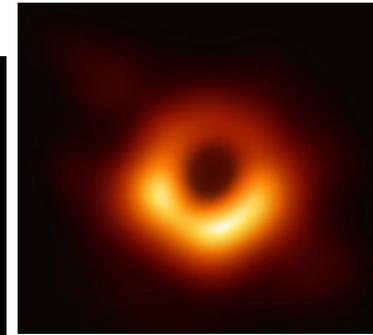
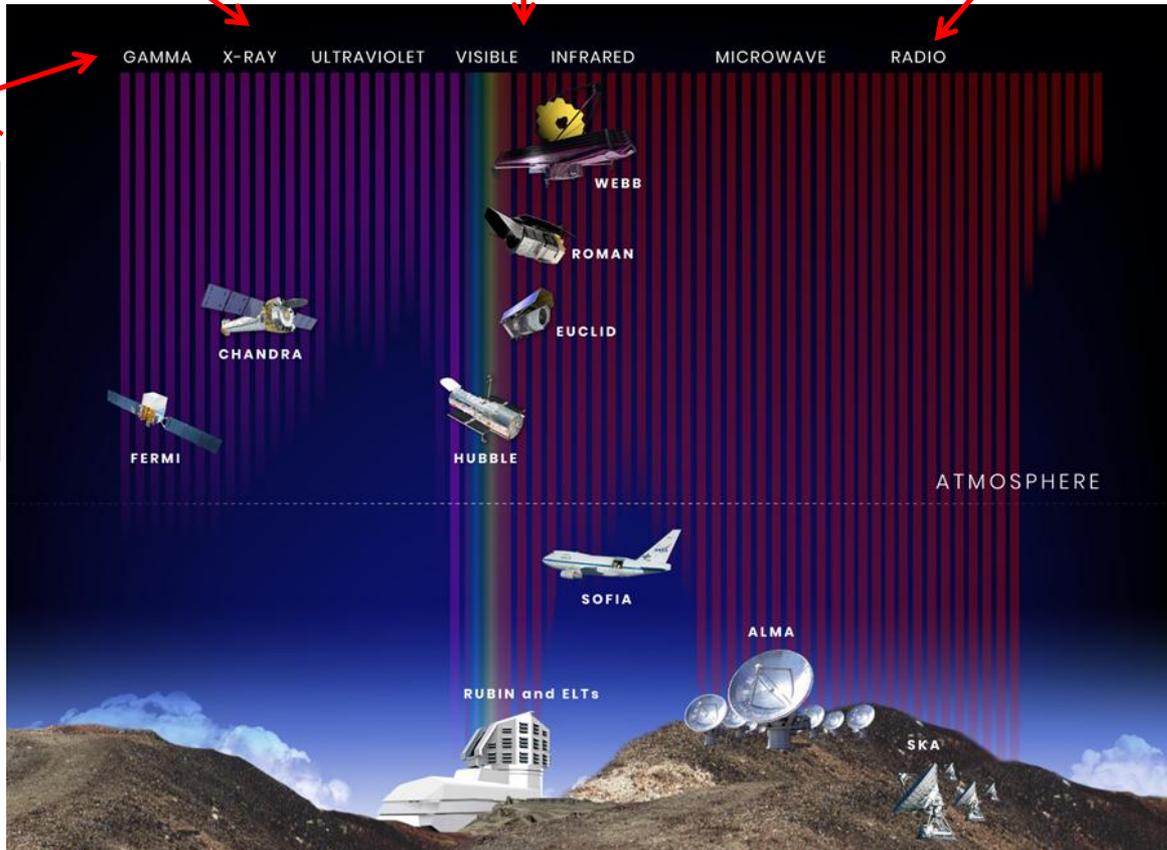
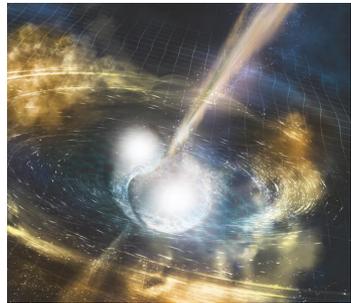


超大質量ブラックホールの発見



パルサーの発見

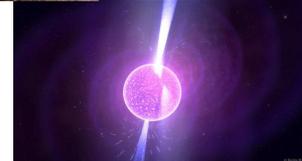
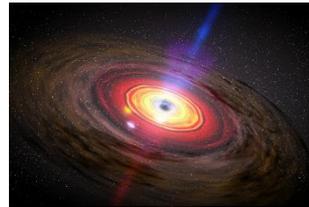
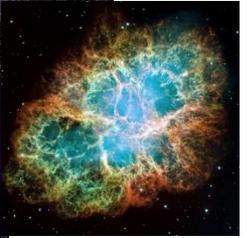
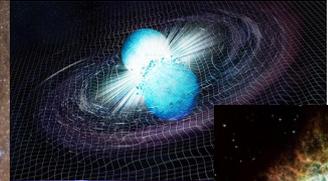
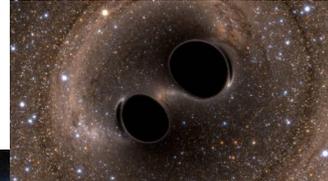
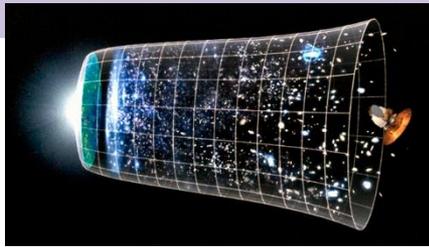
ガンマ線バースト



ブラックホール・シャドウ

重力波のスペクトルと天文学

インフレーション起源の原始重力波



周期 宇宙年齢

年

時間

秒

ミリ秒

周波数
Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

10^3

パルサータイミング

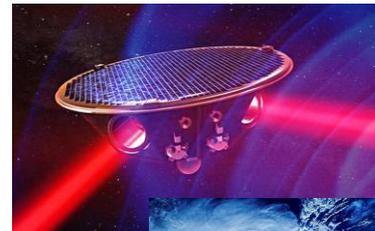
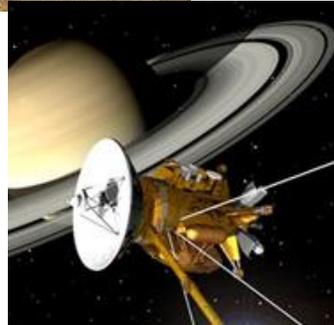
地上干渉計

宇宙マイクロ波
背景放射
Bモード観測

ドップラー
トラッキング

宇宙干渉計

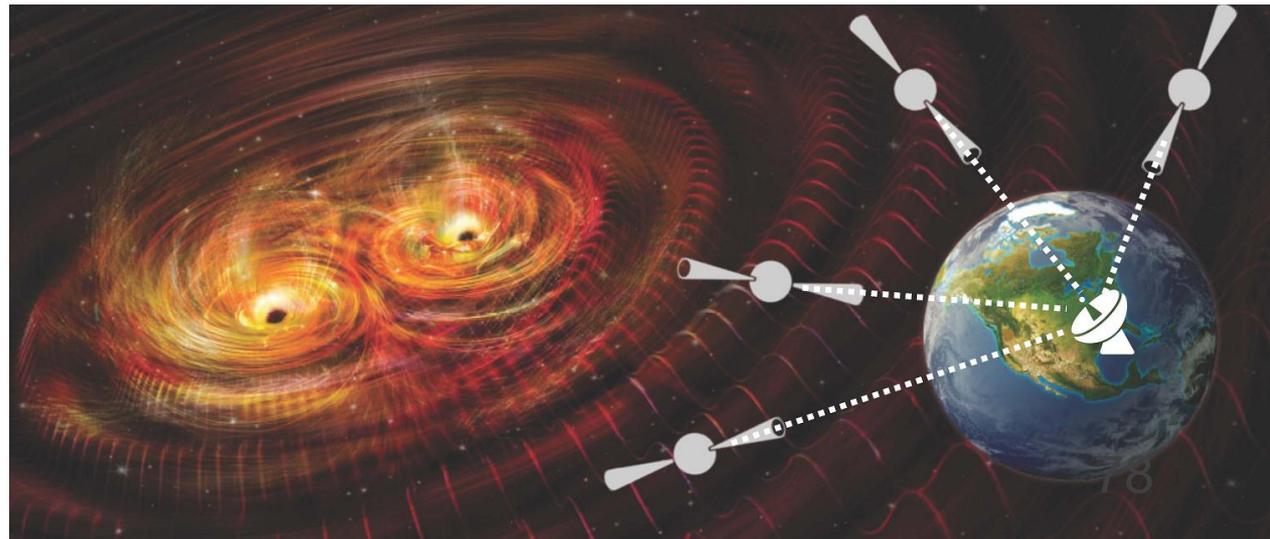
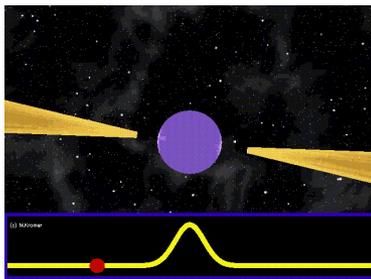
共振型検出器



パルサータイミング

- パルスの周期の変化を長期間にわたって調べる
- 2023年6月 **背景重力波の検出**を発表
 - NANOGrav: 北アメリカ(15年分のデータ)
 - EPTA: ヨーロッパ
 - PPTA: オーストラリア
 - InPTA: インド
 - CPTA: 中国
- 多くの**超大質量ブラックホール連星**からの重力波の重ね合わせか？

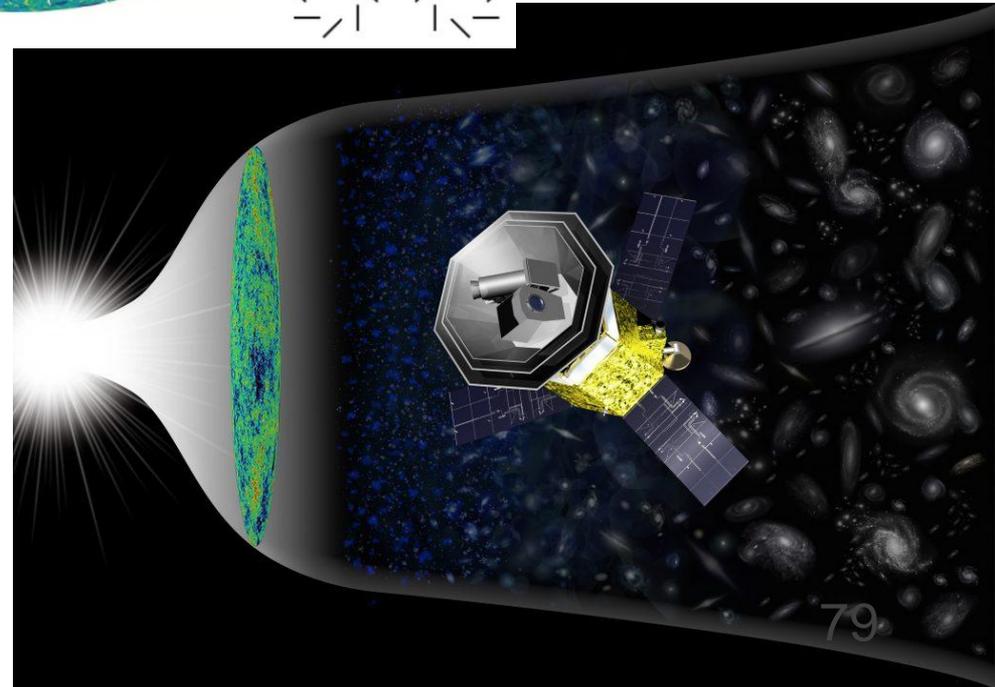
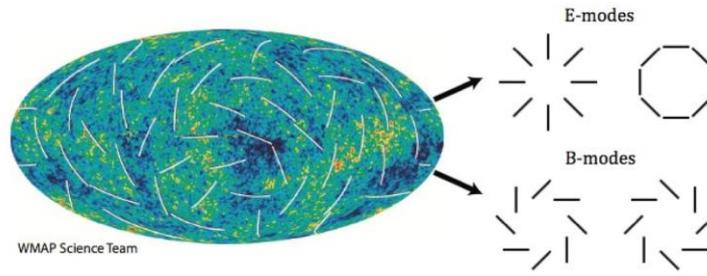
お祝いのケーキ
@Caltech



宇宙マイクロ波背景放射の観測

- 宇宙マイクロ波背景放射
 - 全宇宙からほぼ等方的に観測される2.725 Kの黒体輻射
- この**偏光観測**により、原始重力波をとらえる

- LiteBIRD
 - 2032年の打ち上げを目指す
- Simons Observatory
 - 2024年観測開始



重力波天文学は始まったばかり

- 2015年の初検出以降、**重力波が続々と検出**
- 2023年には**パルサータイミング**も背景重力波検出
- **KAGRA**も感度を向上中
- 2030年代以降には地上の**次世代望遠鏡**、**宇宙望遠鏡**も加わり、全宇宙の連星合体を観測可能に
- 今後も、**重いブラックホール**の起源、**重元素**の起源、**インフレーション**の解明など

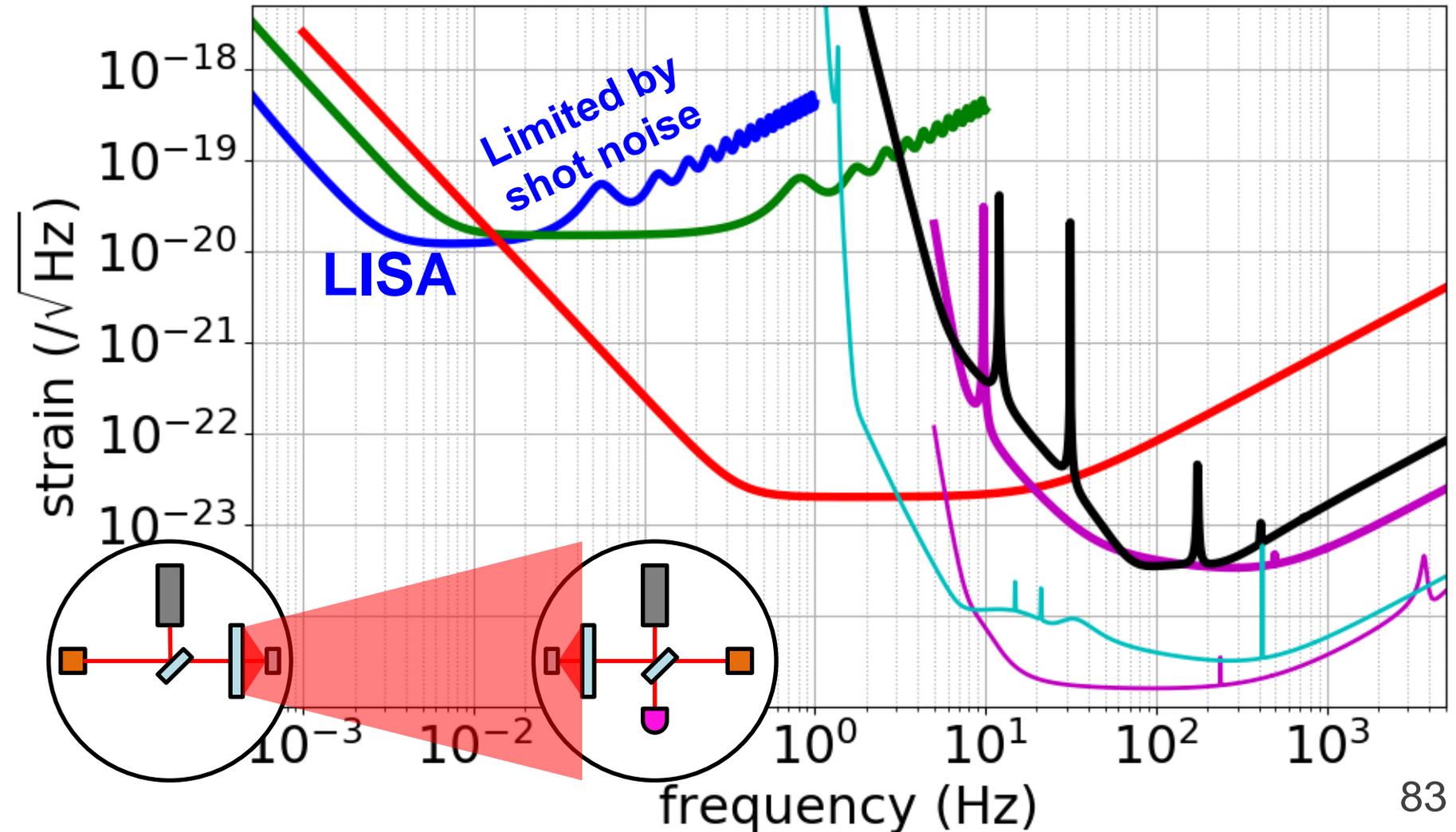


我々はどこから来たのか
我々は何者か
我々はどこへ行くのか
(ポール・ゴーギャン、1897-1898年)

おまけ

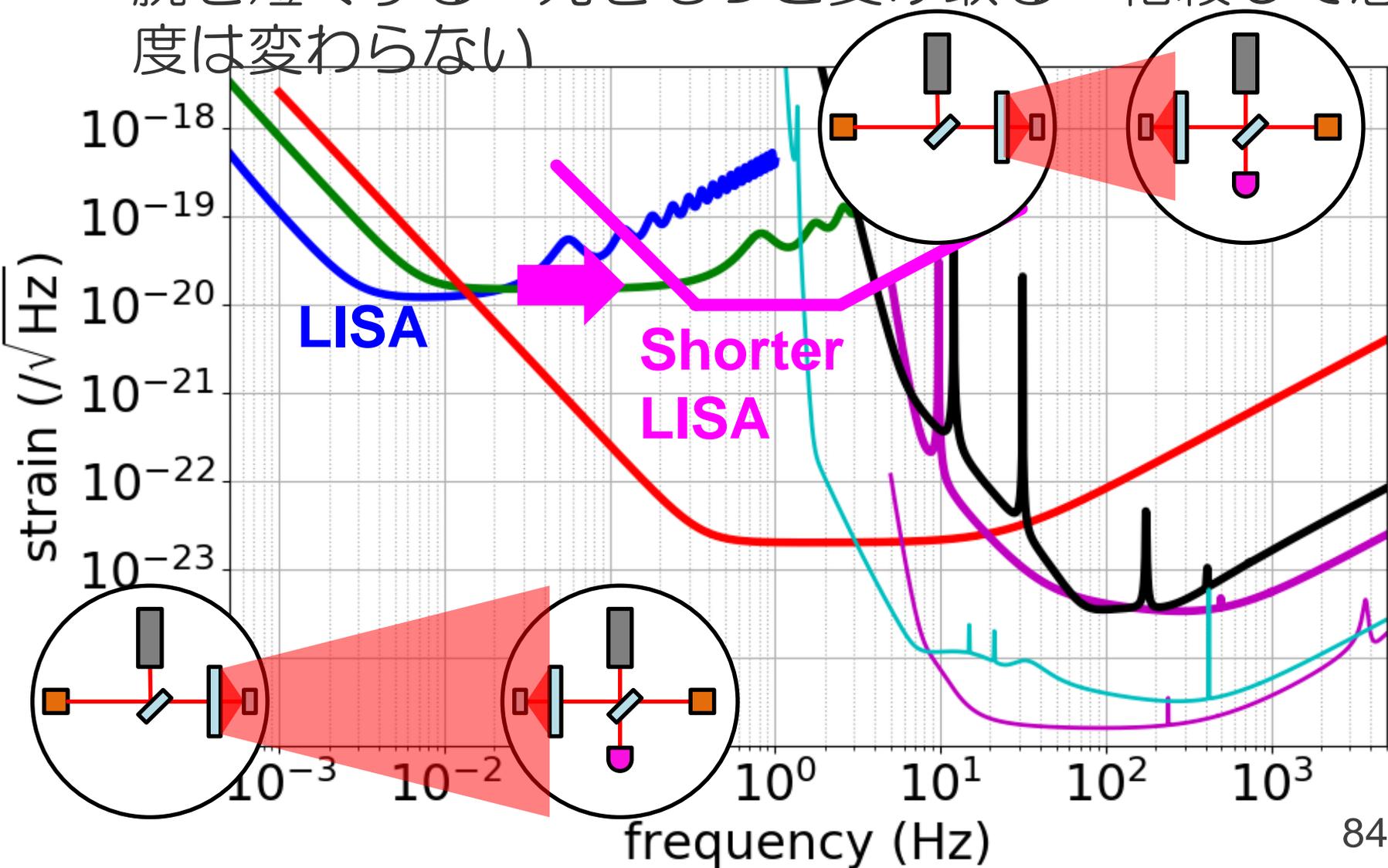
LISAの感度曲線

- 出射した1 Wのうち、 ~ 100 pWを検出



腕を短くしても、感度不足

- 腕を短くする→光をもっと受け取る→相殺して感度は変わらない



DECIGOの実現には光共振器が必要

- 衛星間を光が何度も往復するように光共振器

