

# 自己紹介

## 東京科学大学 山本博章

東大では軟式テニス部



色々な先生に指導して頂いて、素粒子理論の学位



卒業後、渡米して素粒子実験に参加



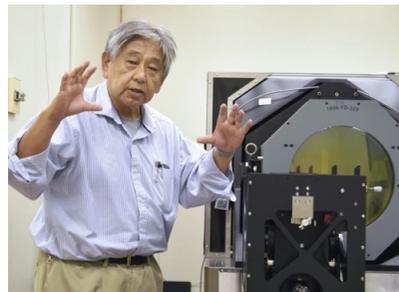
1993年に、超大超伝導加速器プロジェクトが中止



1994年、Barry Barish (2017年ノーベル賞) に誘われてLIGO (大型重力波干渉計) に参加



LIGOでは光学系の研究と干渉計デザインソフトの開発



イタリアのVirgoグループとの共同研究に参加



昨年の6月に、35年働いたCaltechを退職⇒東京科学大学



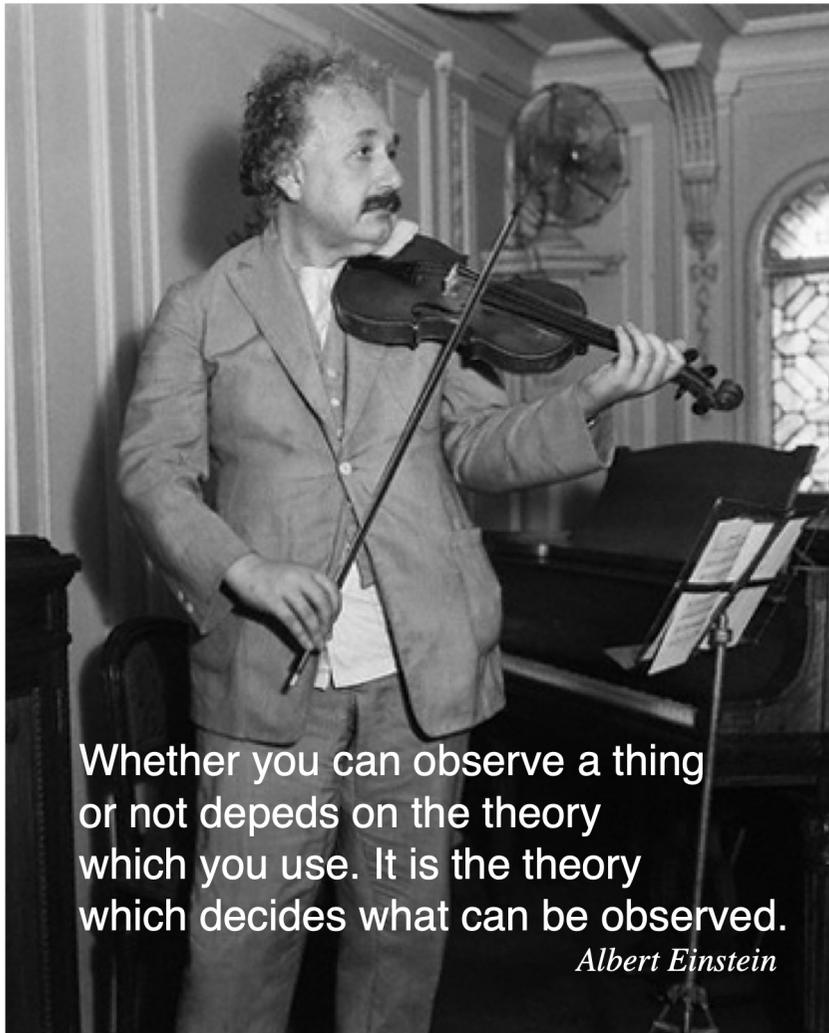


# 宇宙の彼方からの重力波の調べ ~最初の重力波観測 (2015) から10年後の今と未来~

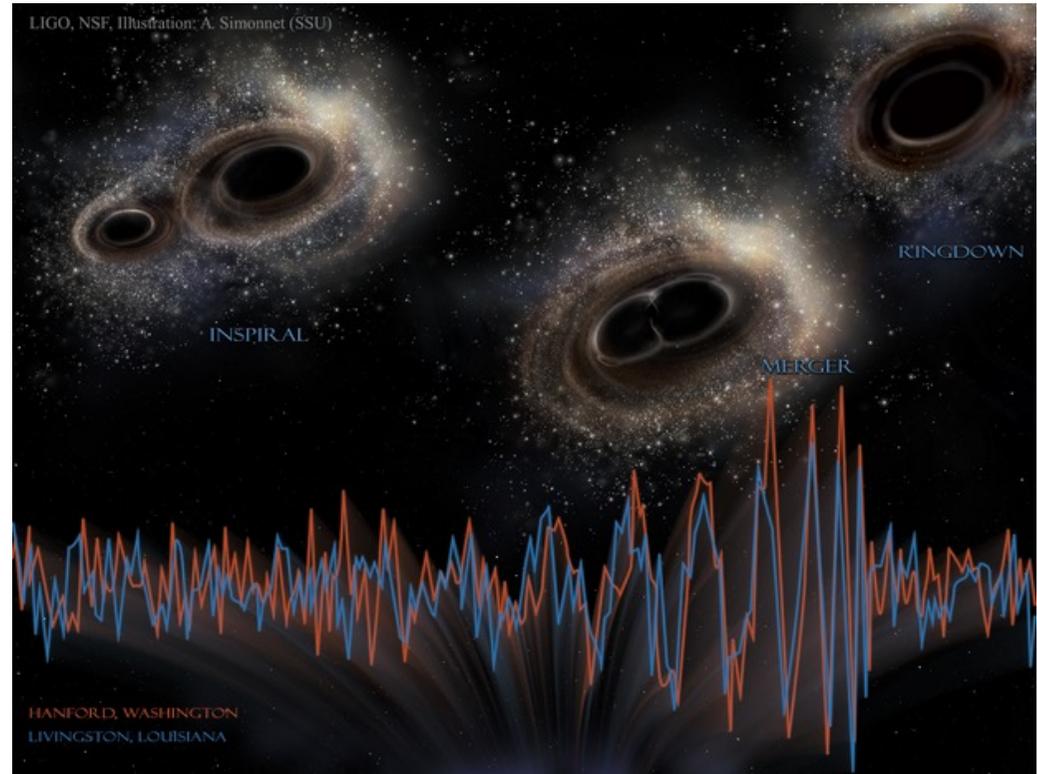


東京科学大学 理学院物理学系宗宮研究室 山本博章

一般相対性理論 ⇒ ブラックホールの合体



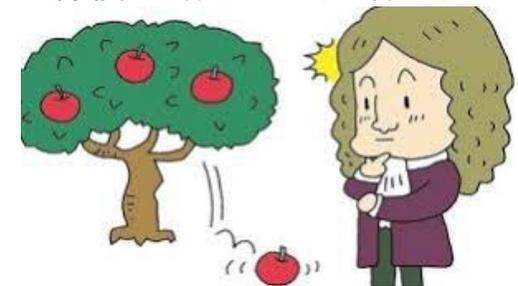
Whether you can observe a thing or not depends on the theory which you use. It is the theory which decides what can be observed.  
*Albert Einstein*



どのような知識を持っているかによって、何を見る事が出来るかが決まります。

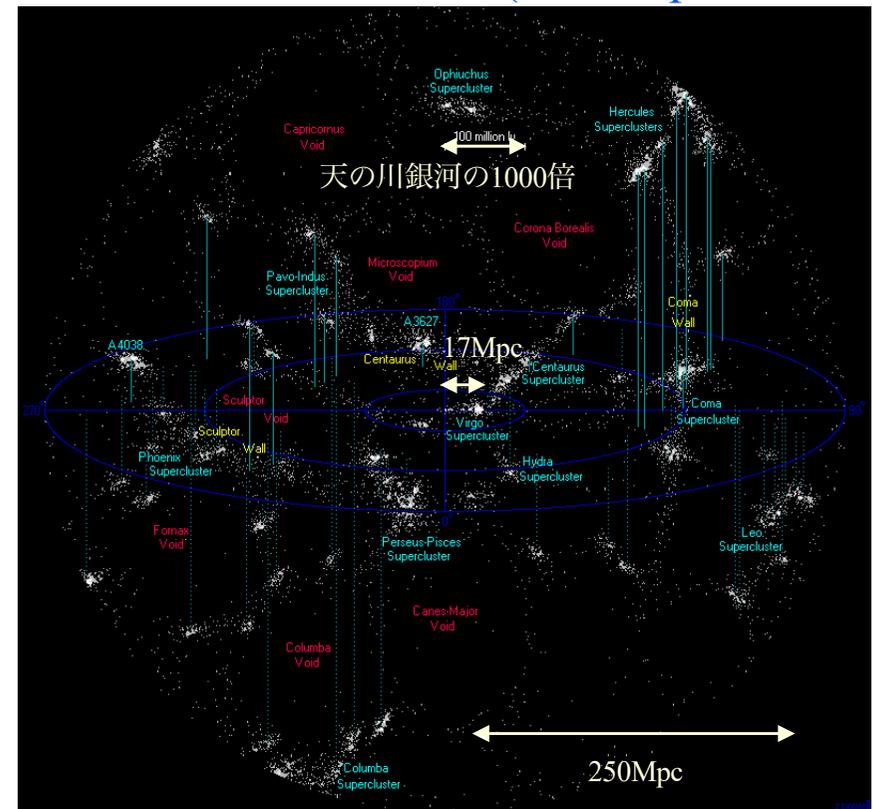
アルバート アインシュタイン

林檎が落ちた⇒万有引力



- これまでの観測結果とその意義
  - » ブラックホールと中性子星の合体の観測
    - 光と重力の違い
    - ブラックホールと中性子星の重さと大きさ
  - » どの位遠くまで見られるか
  - » 重力波の観測までの長い道のり
- 干渉計の働き
  - » 干渉計の原理
  - » 雑音源と対処法
- 将来計画
  - » Cosmic Explorer – 米国
  - » Einstein Telescope – ヨーロッパ

## 超銀河団 (<250Mpc)



(Credit: Galaxy map by Richard Powell)

▶ LIGOのデータ、その他の情報：[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

▶ 一部の図および内容は生成 AI(ChatGPT) の協力により作成した

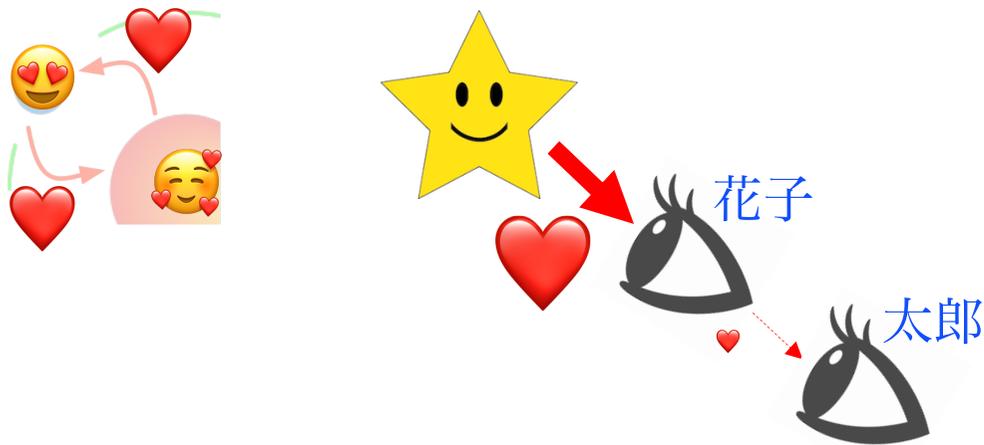
▶ 重さの単位： $1M_{\odot}$ =太陽の重さ= $2 \times 10^{30} \text{kg}$ =地球の重さの33万倍

▶ 長さの単位： $1 \text{Mpc} = 326 \text{万光年} = 3.07 \times 10^{19} \text{km}$ 、天の川銀河 =  $0.03 \text{Mpc} = 10 \text{万光年}$

# 電気と重力

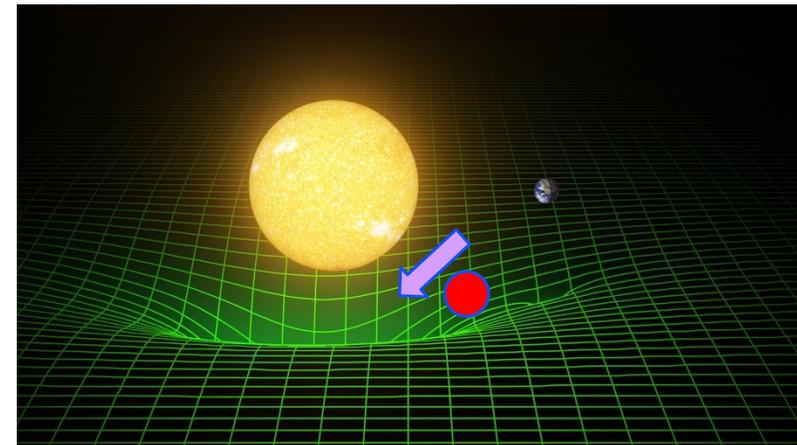
## 電気力と電波：

光の波のキャッチボール



## 重力と重力波：

物質の重さによる空間の歪みとその歪みの伝搬



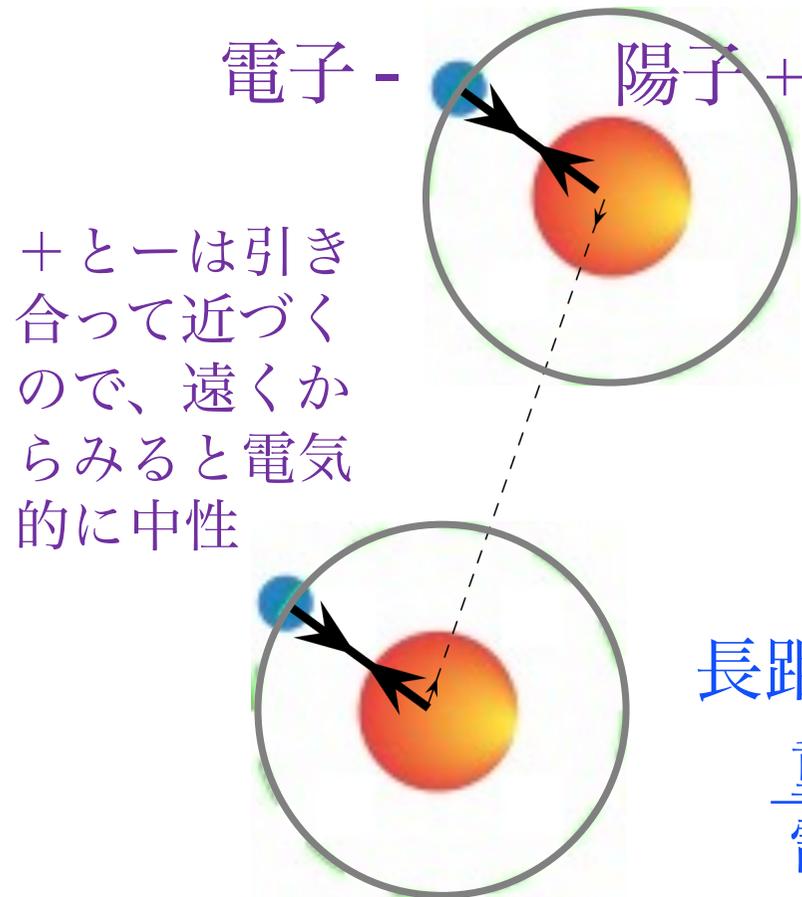
- 強い相互作用
  - 見つけやすい、早い減衰
- 夜空の星と宇宙の構造
- 宇宙の誕生から40万年以降の世界 (光が、今の地球に到達出来る時間)

- 弱い相互作用
  - 見つけにくい、遅い減衰
- 光では見えない宇宙の構造
- 光では知る事の出来ない宇宙の誕生から $10^{-44}$ 秒以降の世界

とても弱い重力が、宇宙では一番大事

電気力～電荷の積 / 距離の二乗

重力～重さの積 / 距離の二乗



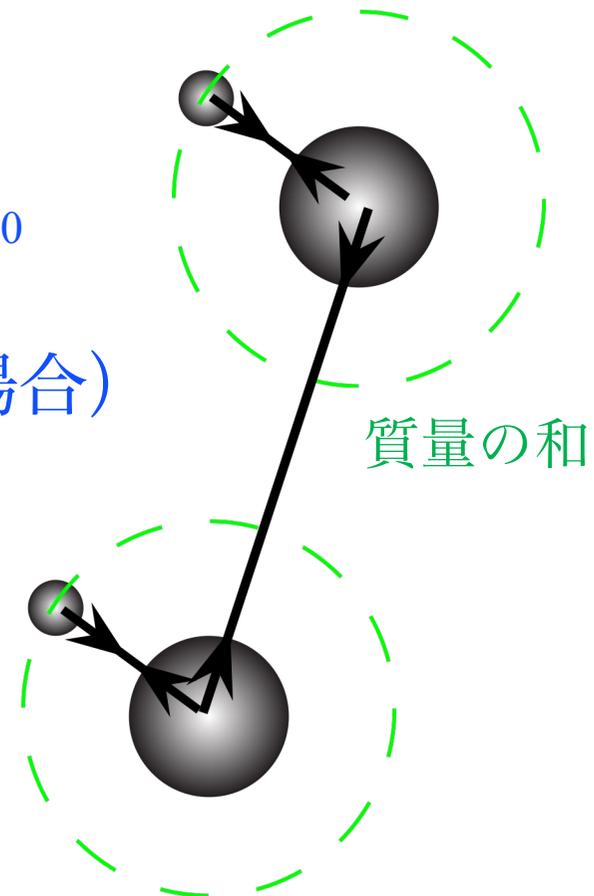
短距離では

$$\frac{\text{重力}}{\text{電気}} = 10^{-40}$$

(水素原子の場合)

長距離では

$$\frac{\text{重力}}{\text{電気}} = \text{無限大}$$





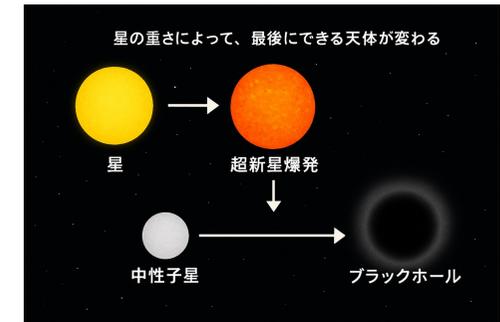
# ブラックホールと中性子星 ChatGPTに教えて貰いました



## 星の一生の終わり方

星は最後に「燃料（核燃料）」がなくなると、自分の重力でつぶれていきます。このとき、星の重さ（質量）によって、最終的にどうなるかが決まります。

| 星の重さ（もとの星）        | 最後にできる天体        |
|-------------------|-----------------|
| 小さい星（太陽ぐらい）       | 白色矮星（はくしょくわいせい） |
| 少し大きい星（太陽の8～20倍）  | 中性子星            |
| もっと大きい星（太陽の20倍以上） | ブラックホール         |



### ■ ブラックホールとは？

ブラックホールとは、「とてつもなく重い星」がつぶれてできた、なんでも強い重力で引き寄せてしまう天体のことです。ブラックホールからは、何も外に出られません。

### 🌀 どうやってできるの？

星の一生の最後に、燃料（核燃料）がなくなると、星は自分の重さに耐えきれなくなってつぶれてしまいます。とても大きな星（太陽の何十倍も重い星）の場合、このつぶれる力が強すぎて、中心が無限に近いほど小さくなってしまいます。

### 🌀 中性子星ってなに？

中性子星は、「とても重い星」のなれの果てです。星が一生を終えるときに爆発（超新星爆発）して、そのあとにぎゅーっとなつぶれた残りが中性子星になります。

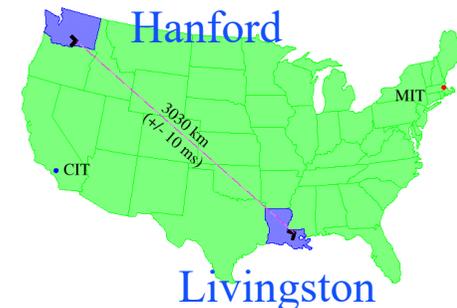
### 🌀 どうして「中性子」なの？

星の中の原子は、つぶれるときにすごい圧力で押しつぶされて、電子と陽子がくっついて中性子だけになります。だから「中性子星」なんです。



GW150915 : PRL  
116,061102(2016)

2015年9月14日に観測された



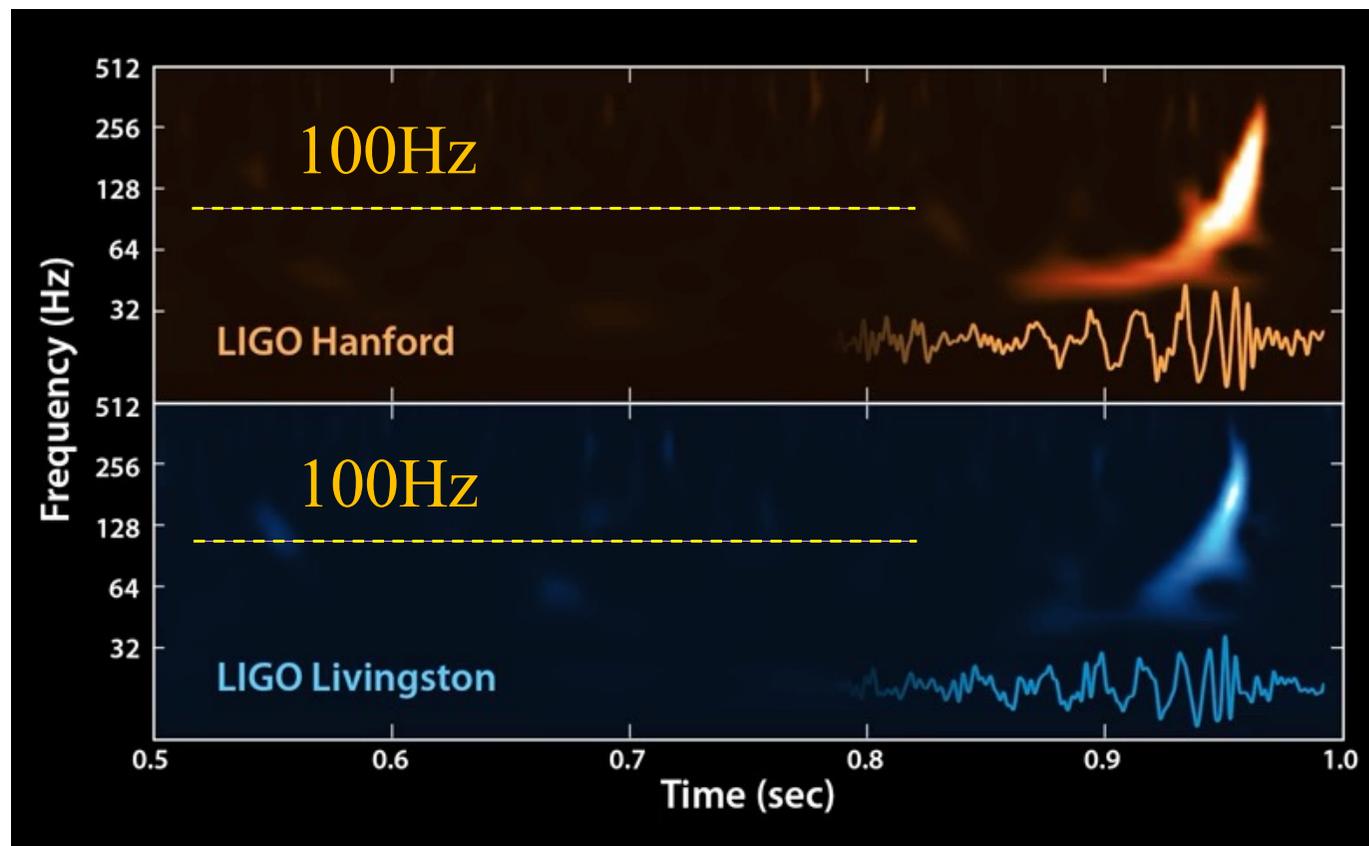
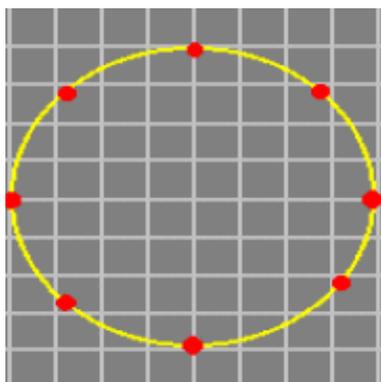
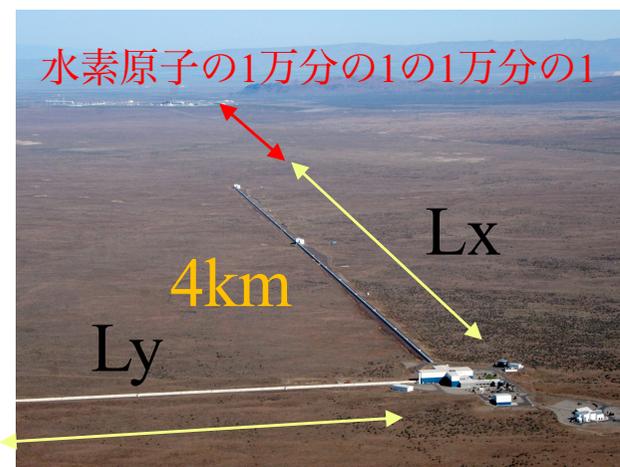
# 初めての重力波信号

## 2個のブラックホールの合体で放出

SEPTEMBER 14, 2015

アインシュタインの一般相対論から100年の長い道のり

腕の長さの差 ( $L_x - L_y$ )の時間変化



最初にリビングストン干渉計で、そして1000分の7秒後にハンフォード干渉計で信号が観測された



昔々、遠い宇宙の彼方での出来事です

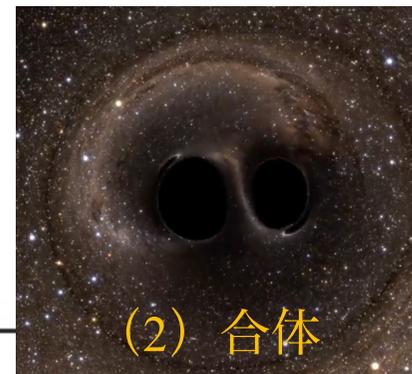


– 13億年前に出た重力波が今地球に到着 –

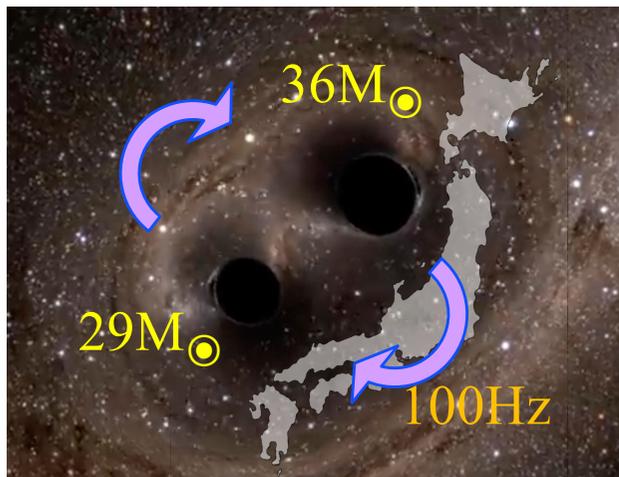
一般相対性理論に基づく連星ブラックホール合体の数値シミュレーション

実際の100分の1の速度での映像です





(1) 渦巻き運動



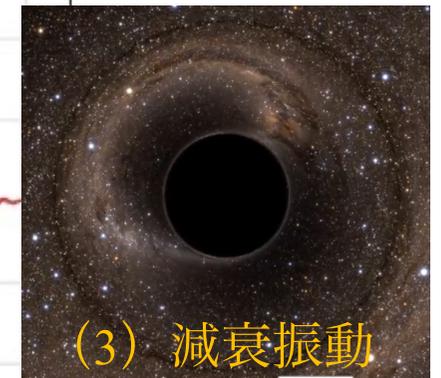
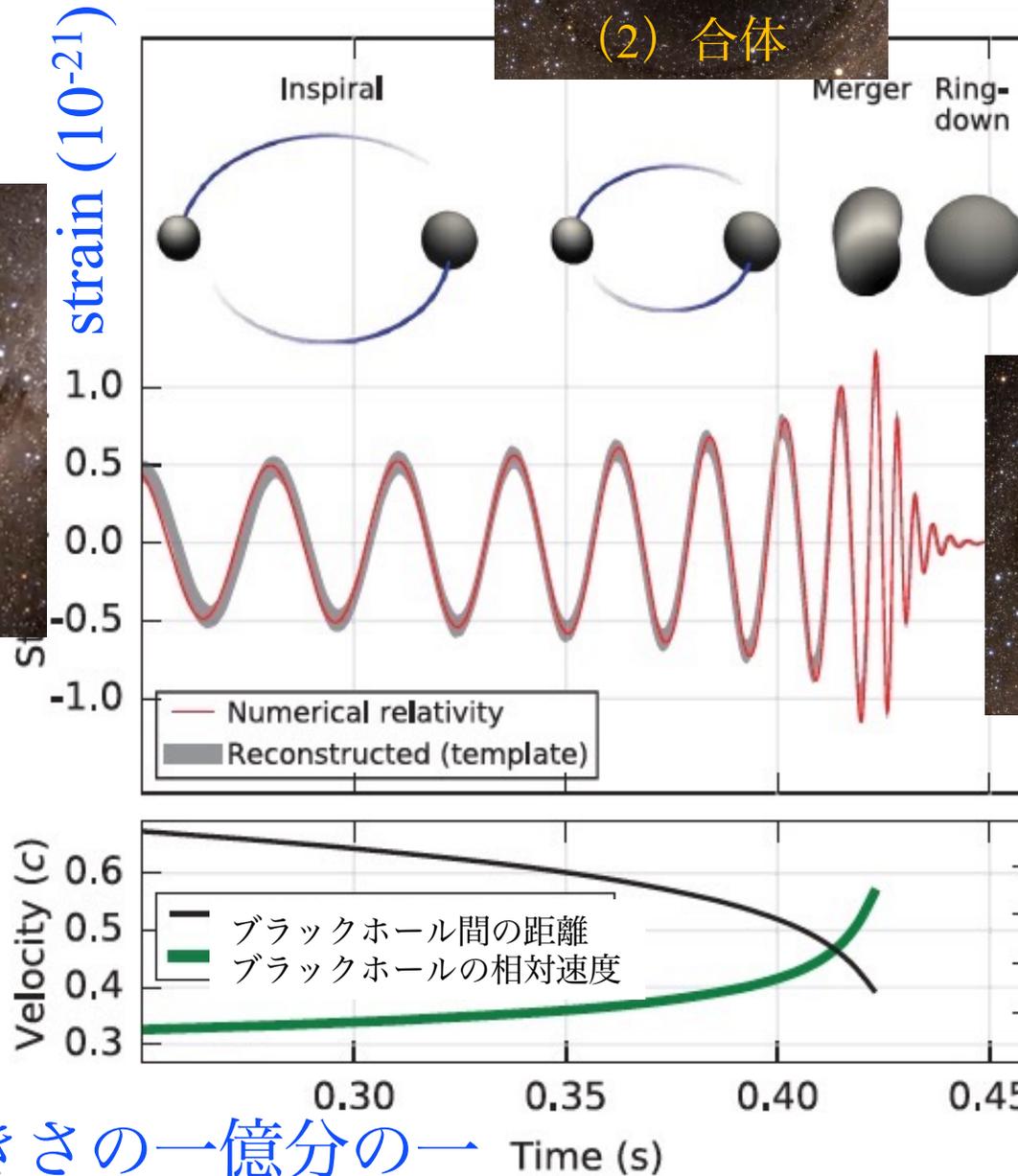
dL=腕の長さの伸び縮み

$$strain = \frac{dL}{L}$$

$$dL = 4000m \times 10^{-21}$$

$$= 4 \times 10^{-18} m$$

= 水素原子の大きさの一億分の一



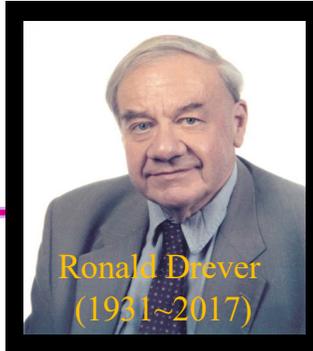




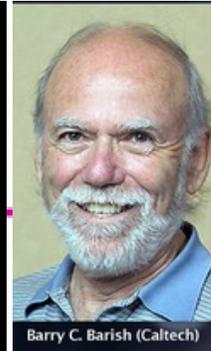
# 重力波観測への道



Robby Vogt



Ronald Drever  
(1931~2017)



Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



1932 ~ 2025

Rainer Weiss (MIT)

2017 Nobel Prize in Physics

## ● 情熱を持った人達

- › 一般相対論の意味を探った人達
- › 重力波を見つける実験手法を追い求めた人達
  - 今のLIGOは、DreverとWeissのアイデアの結晶
- › 大型プロジェクトを組織し (Caltech、Glasgow、MIT)、手探りで予算を獲得
- › 高エネルギー物理研究で培った大型実験の手法を重力波観測実験で生かした人達

## ● NSF (米国の文科省に相当) の長年に亘る財政面の援助

- › 1970年代から継続した援助
- › 1990年に入ってから大型援助の決断 (合計2000億円)

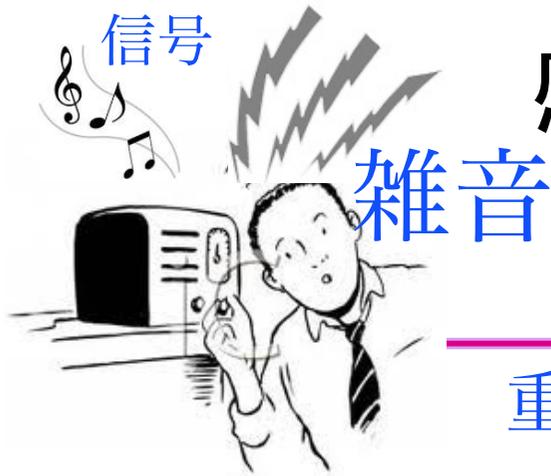
## ● 時間をかけての準備

- › 黎明期 (1970年~)、第一期 (開発、1994年~2008年) から第二期 (観測、2008年~) へ
  - 第一期は、200億円かけての、技術検証 — 目標は、信号の観測ではなく、設計感度で1年運転出来るか
  - 最初の重力波信号は、第二期の準備運転の時、見つかった
    - 本物である事の確認に、半年かかった — 箝口令: 家族にも話さな
- › 注意深い技術開発と選択
- › 第一期での失敗や経験を第二期で生かす努力

## ● 情熱と努力へのご褒美のグッドラック

- › 非常に強い最初のブラックホール合体 (GW150914)、直ぐ側で起こった中性子合体 (GW170817)

~ドジャーズの山本が、ワールドシリーズの第6戦が終わった後で、第7戦に備えて肩を作っておいたので、優勝出来た。



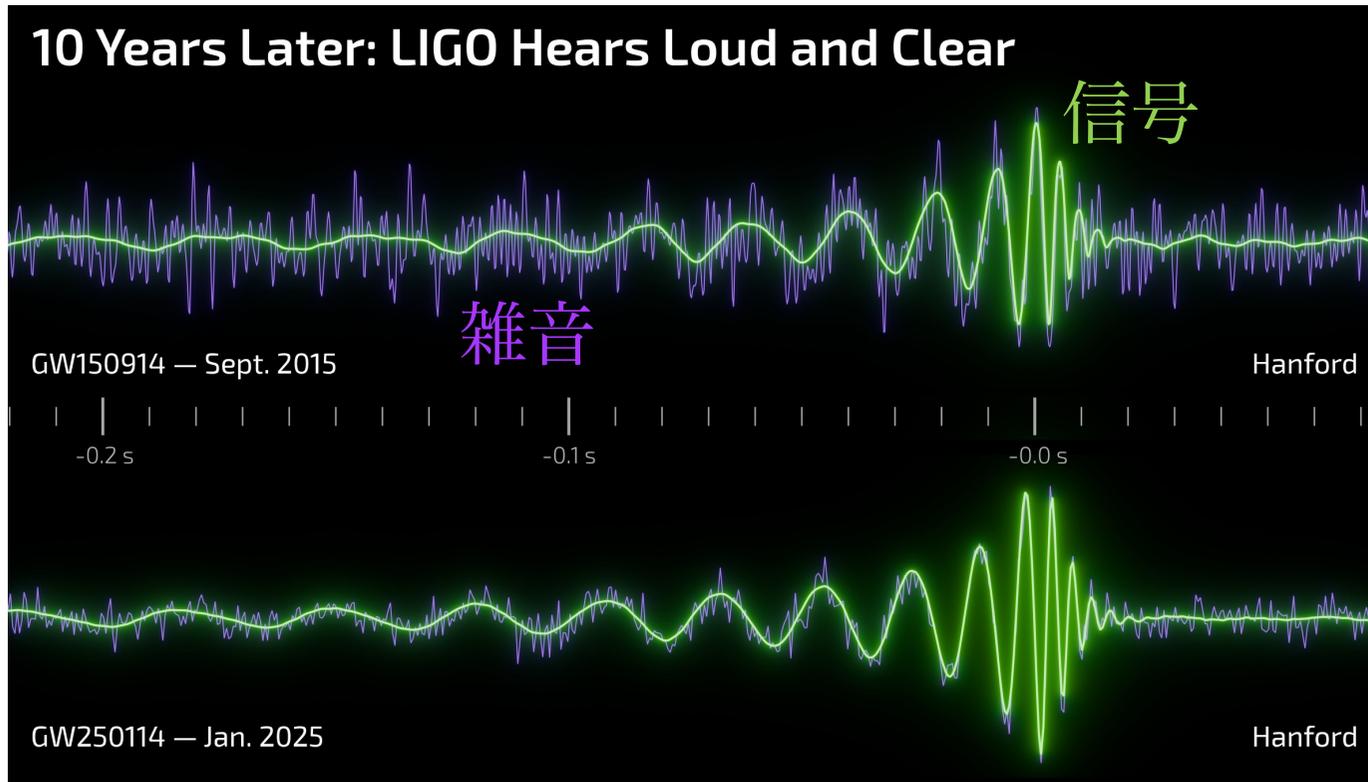
# 感度曲線と信号強度

Phys. Rev. X 6, 041015 (2016)



## 重力波観測の限界を決める雑音

### 2015年の最初の重力波信号



### 10年後の綺麗な重力波信号



# LIGOはどの位 遠くまで見られるのか

- 位置特定には複数の観測が必要。LIGOは2台。Virgo、KAGRAが参加する事で、改善。
- 観測距離：1.4M<sub>☉</sub>の中性子星の対合体がはっきり (S/N>8) 観測出来る距離

## ● 1994 ~ Initial LIGO : 実証運転

» 2005年11月4日 ~ 2007年9月31日

- 実証運転 5 @ 15 Mpc
  - 設計感度で一年間運転：NSFとの契約
- 実証運転 6 @ 18 Mpc
  - Advanced LIGOの新しい技術の試験

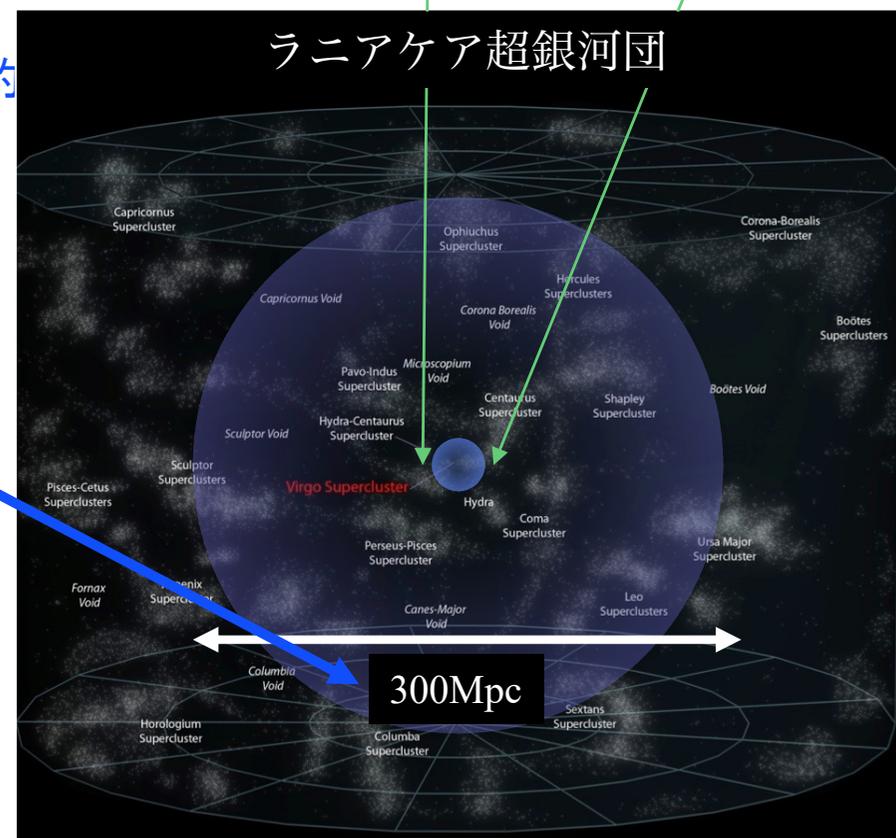
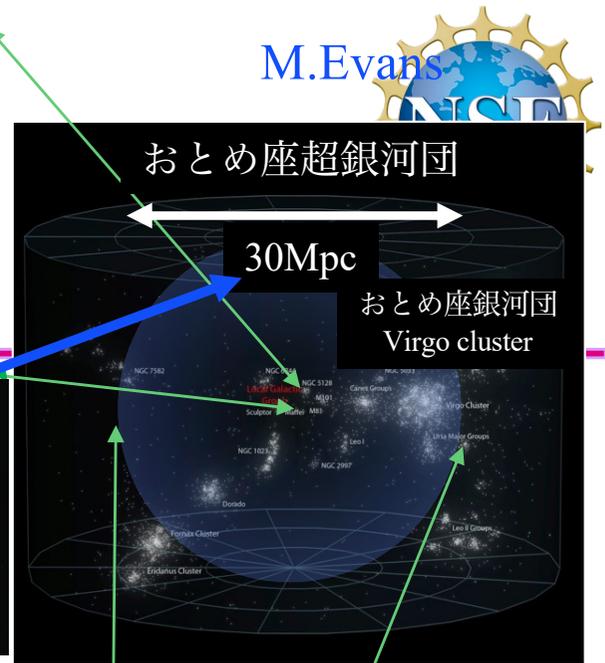
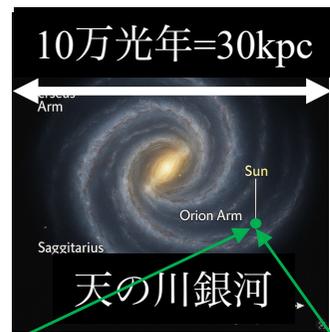
## ● 2008 ~ Advanced LIGO : 観測運転

» 2015年9月12日 ~ 2016年1月19日

- 観測運転 1
  - @ L1 60Mpc, H1 80Mpc
- GW150914

» 2023年5月24日 ~ 2025年11月18日

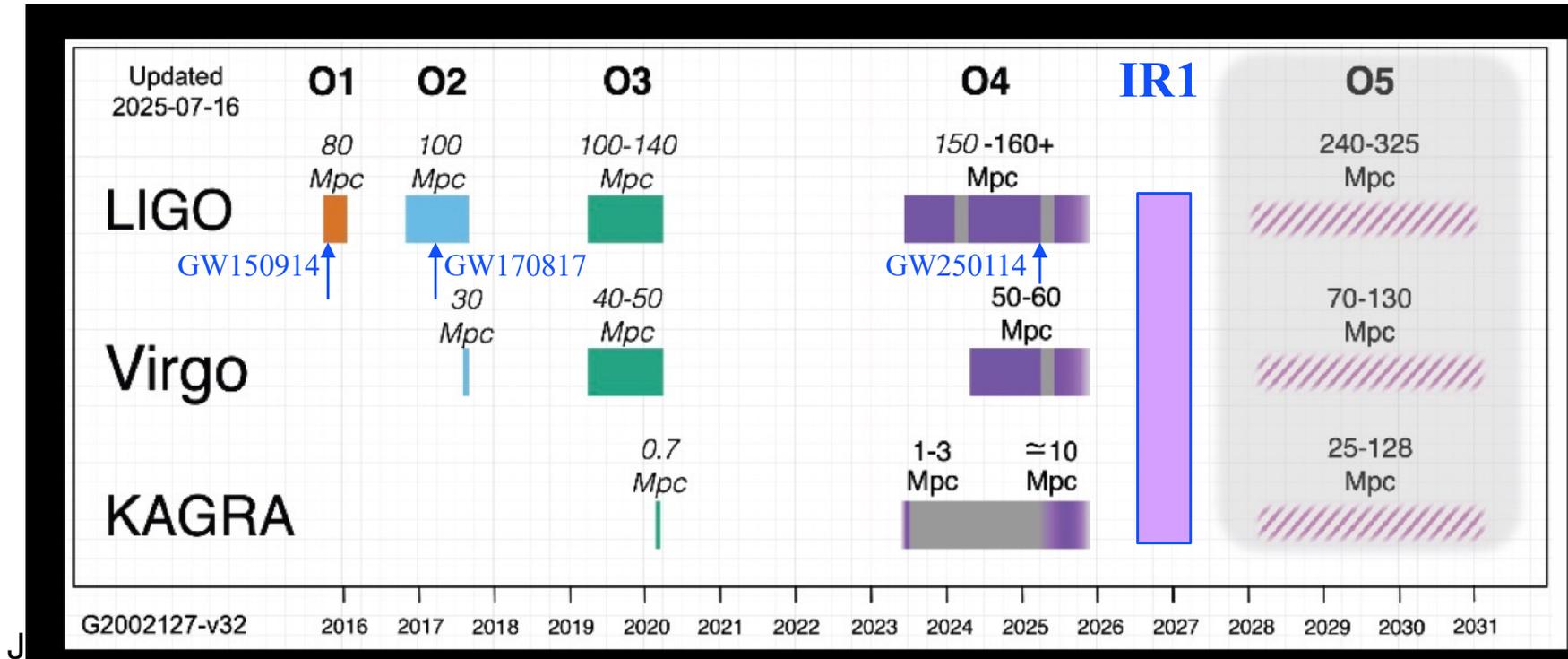
- 観測運転 4a,b,c
  - @ L1 177Mpc, H1 165Mpc
- ~220の重力波信号



# 重力波観測

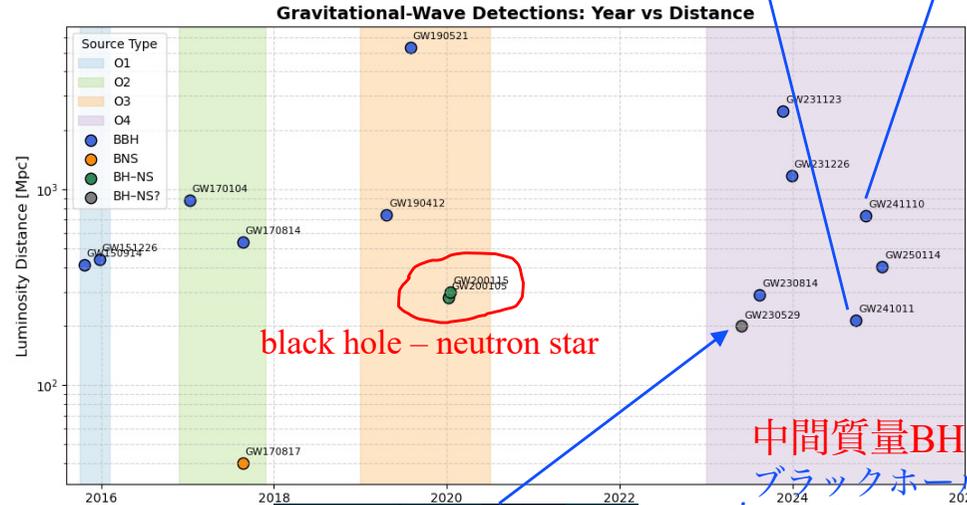
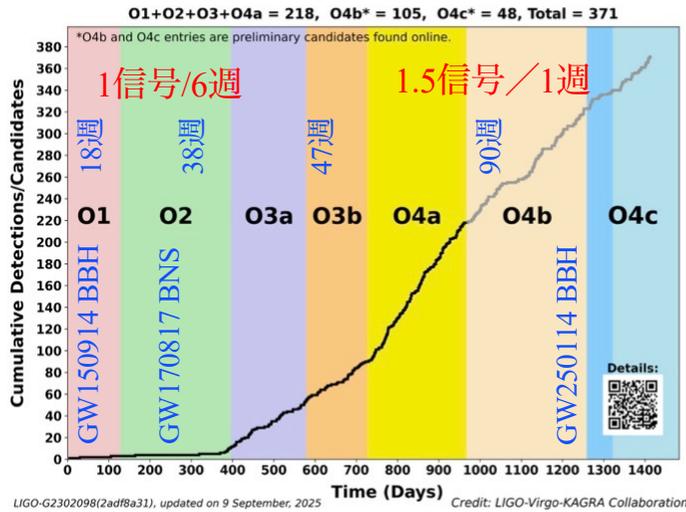
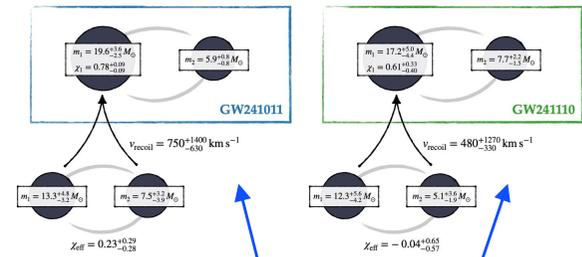
- 観測距離： $1.4M_{\odot}$ の中性子星の対合体がはっきり観測出来る距離
- 重い星からの信号が強いので、ブラックホール合体は、中性子星の約10~20倍遠くからでも検出出来る。
- 距離が大きいと、探せる体積が大きいのので、遠くの信号を捕まえやすい。
- IR1はチリのベラ・ルービン天文台との同時観測を目標とする。

重力波信号と光学信号 を組み合わせて、同一天体を複数のメッセンジャーで理解する

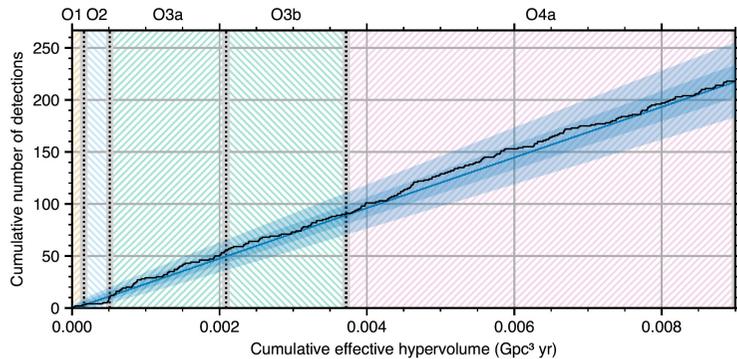




# 信号のプロフィール



中間質量BH  
ブラックホールの成長  
の中間段階

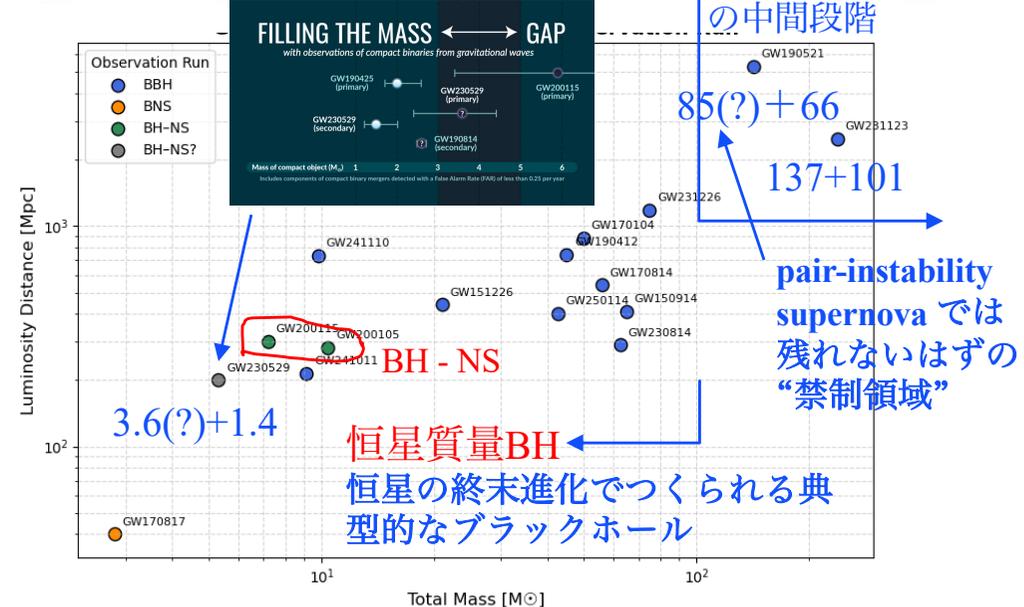


T (4π/3)R<sup>3</sup>の積算 vs 信号数の積算  
→合体頻度はポアソン分布

arXiv:2508.18080v2

JGW-G2516939

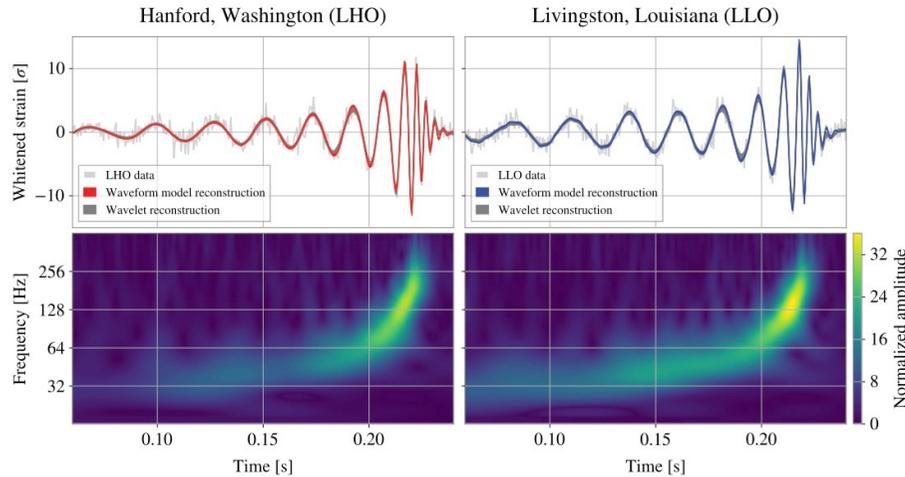
アストロ・アカ...



恒星質量BH  
恒星の終末進化でつくられる典型的なブラックホール

pair-instability  
supernova では  
残れないはずの  
"禁制領域"

## 非常に高 SNR(77-80)のブラックホール連星合体



**Kerr ブラックホール “no-hair theorem” の直接検証**  
 生成された BH の質量、スピン、リングダウン周波数  
 衰減時間から、**Kerr** 計量の遷移モードと一致するかをき  
 わめて高精度で検証可能。

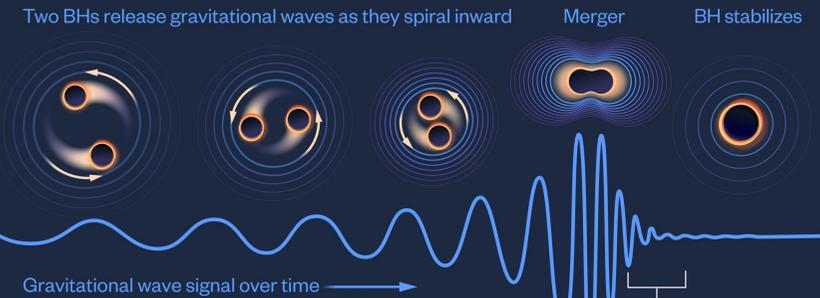
**Kerr**ブラックホールとは、回転しているブラックホールの  
 一般相対論解のことです。**無毛定理 (no-hair theorem)** の  
 基礎は、**KerrBH**は、質量と角運動量だけによる。

**Hawking**の“面積定理”の厳密テスト  
 事象の地平面の面積が減少しない (area theorem) という  
**Hawking** の予言を、この信号により高精度で確認

事象の地平面とは、一度入るとどんなものでも二度と外へ出  
 られない境界面。非回転ブラックホールの半径は  $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

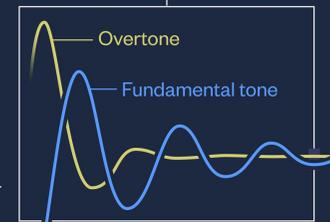
### Clear Signal Sheds Light on Black Holes

When two black holes (BHs) collide and merge, they release gravitational waves. These waves can be detected by sensitive instruments on Earth, allowing scientists to determine the mass and spin of the BHs. The clearest BH merger signal yet, named GW250114, recorded by LIGO in January 2025, offers new insights into these mysterious cosmic giants.



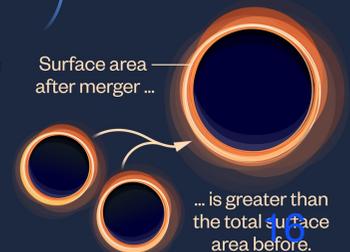
#### Telling Overtones

A fleeting secondary tone was detected in the signal, offering a rare chance to test the “**Kerr solution**,” which describes a rotating BH using only mass and spin. Excitingly, the mass and spin values from this **overtone** matched those from the **fundamental tone**. If they had differed, it would imply that additional properties are necessary to describe a BH, but a match confirms that — at least for this BH — no other details are needed.



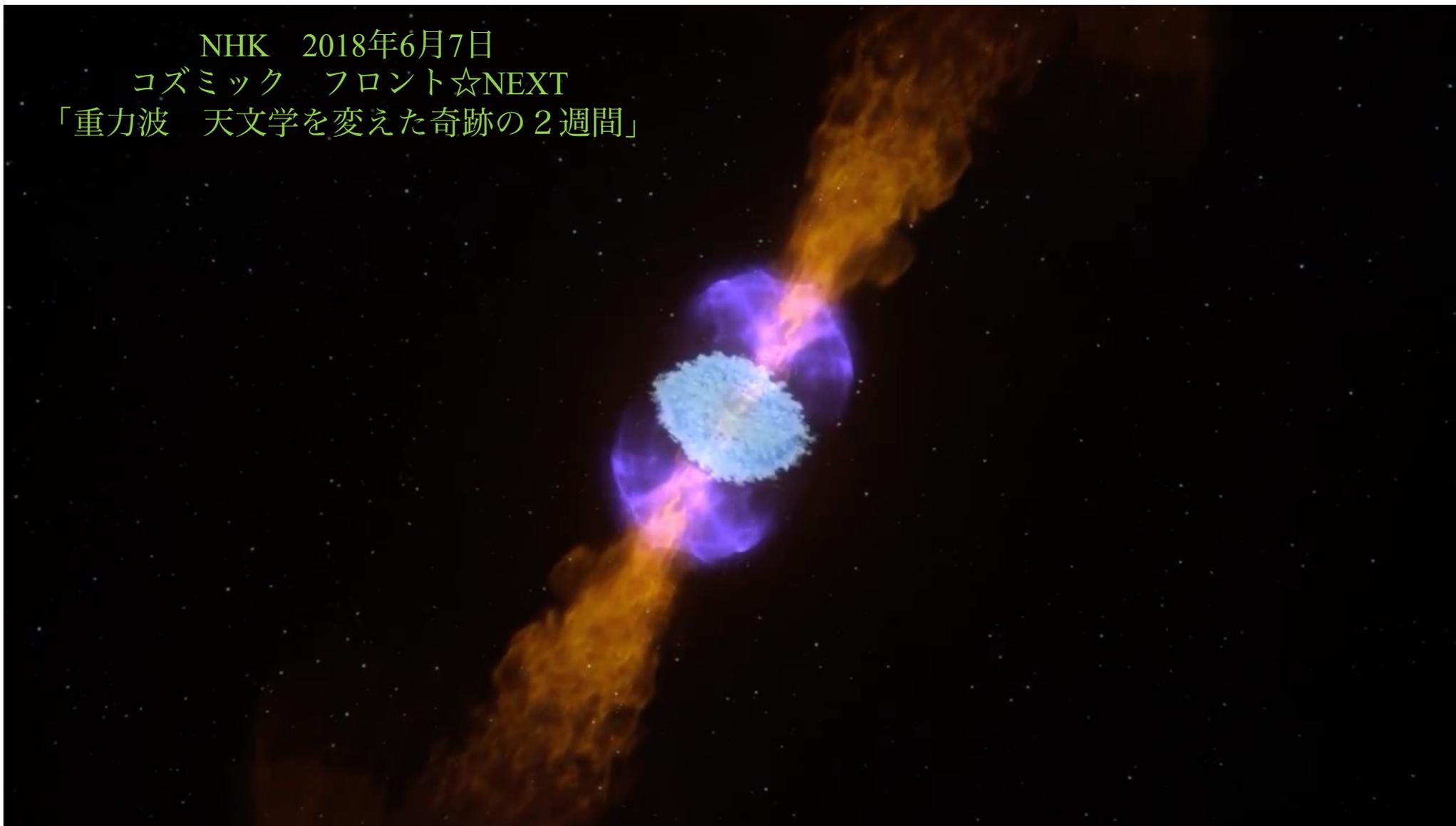
#### Forever Growing

The signal also tested **Hawking’s area theorem**, which states that a BH’s surface area can never decrease — it can only grow. Surface area of a BH is determined by the area of its **event horizon** and is proportional to the square of the BH’s mass. Comparing the BHs before and after the merger confirmed that the surface area had increased, supporting the theorem.



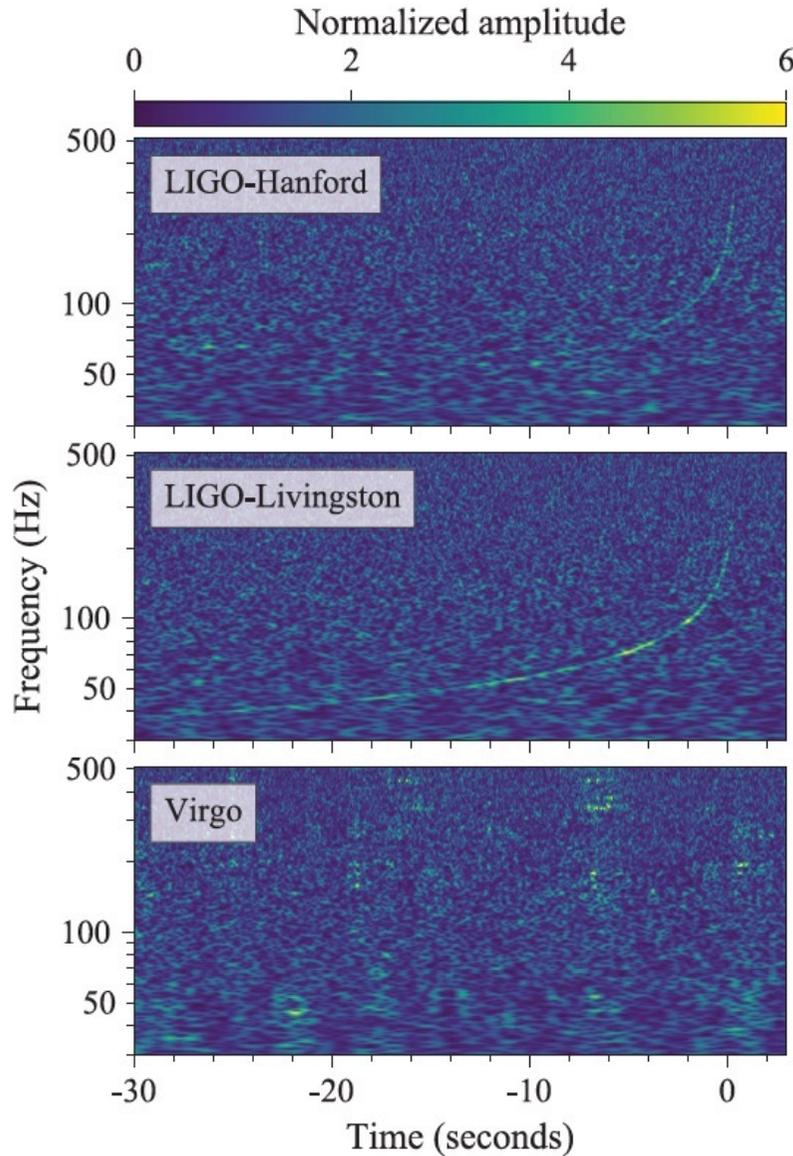
# 2017年8月17日に始まった 連星中性子星合体の観測と、 新たな天文学の夜明け

NHK 2018年6月7日  
コズミック フロント☆NEXT  
「重力波 天文学を変えた奇跡の2週間」

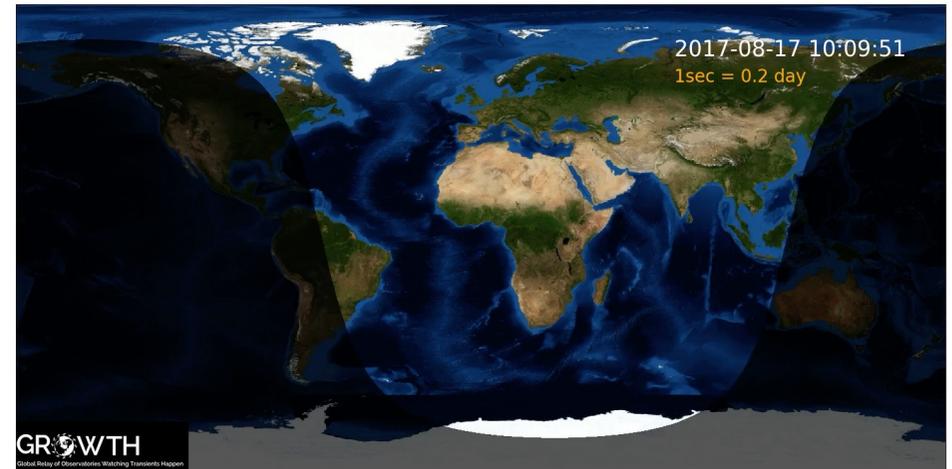
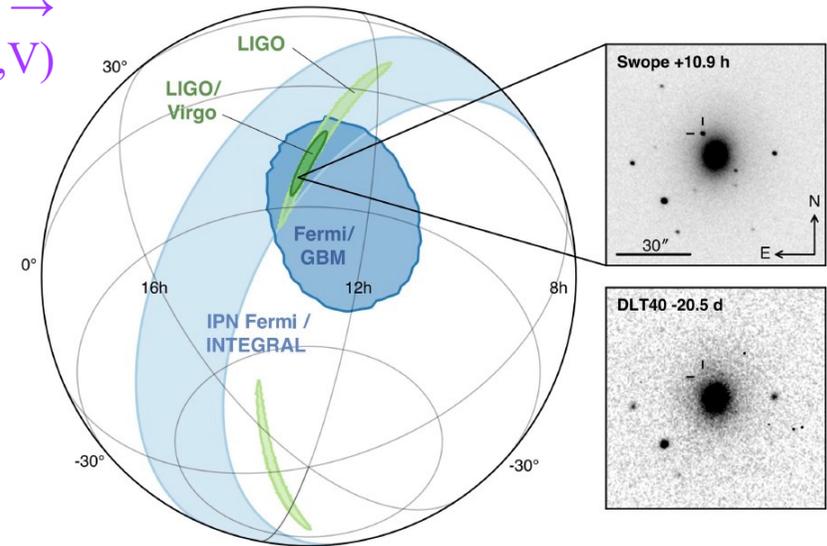


# 2017年8月17日に観測された信号

PRL 119, 161101 (2017), Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017)



190 deg<sup>2</sup> (L,H) →  
31 deg<sup>2</sup> (L,H,V)





# GW170817+GRB170817A

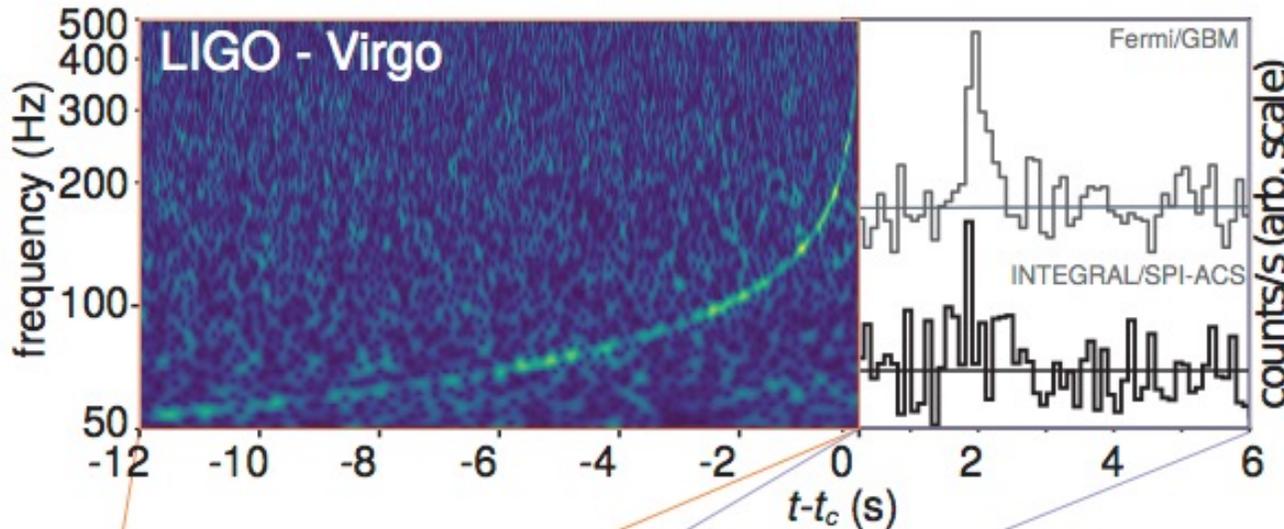


## LIGOの重力波と Fermi Gamma-ray Burst Monitorの信号

Astrophys. J. Lett. 848, L13 (2017)

$L = 1.23 \times 10^{24} \text{m}$

$\longleftrightarrow 1.734 \pm 0.054 \text{ seconds}$



$$-3 \cdot 10^{-15} < \frac{v_{GW} - v_{EM}}{v_{EM}} < +7 \cdot 10^{-16}$$

GW  
LIGO, Virgo

$\gamma$ -ray

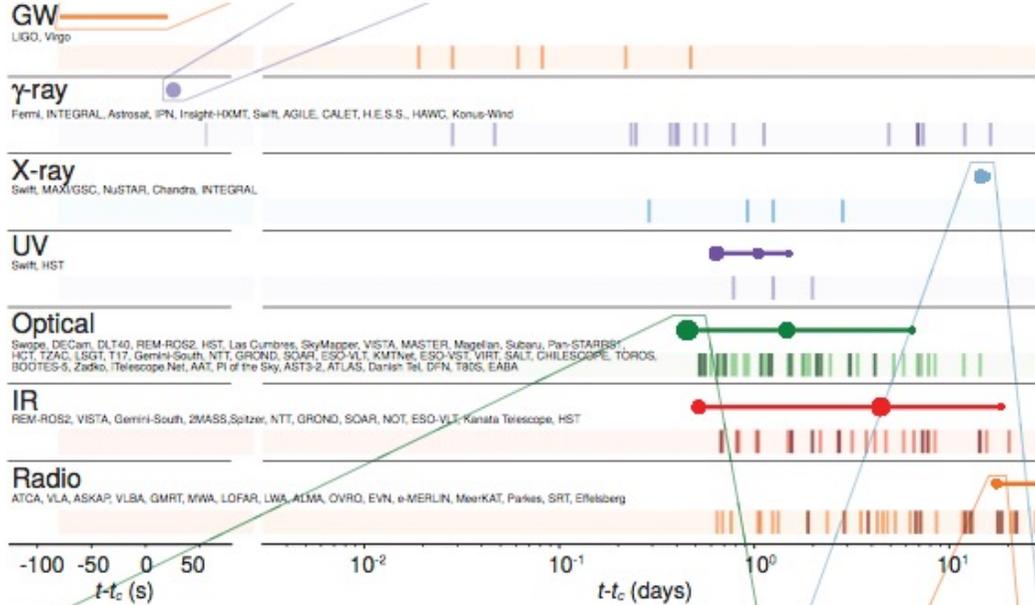
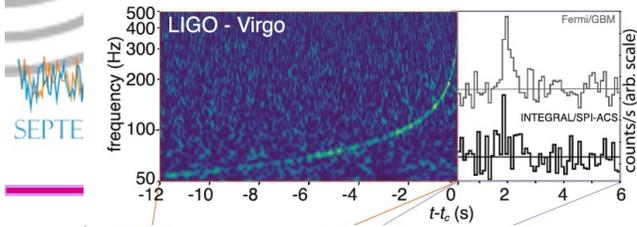
Fermi, INTEGRAL, Astrosat, IPN, Insight-HXMT, Swift, AGILE, CALET, H.E.S.S., HAWC, Konus-Wind

t(seconds)

t(days)

## 電磁信号による経過観測

Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017)



$<10^{-11}$  m  
 $10^{19} \sim 10^{22}$  Hz

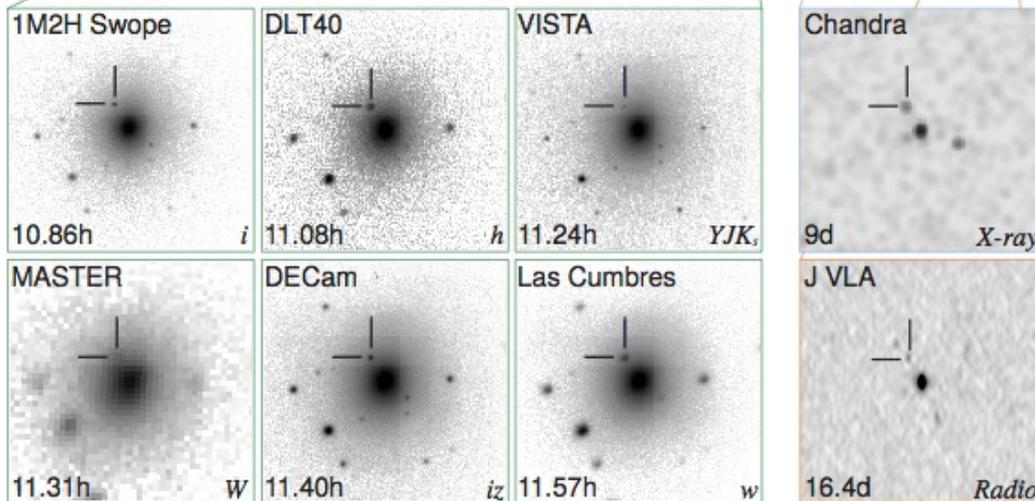
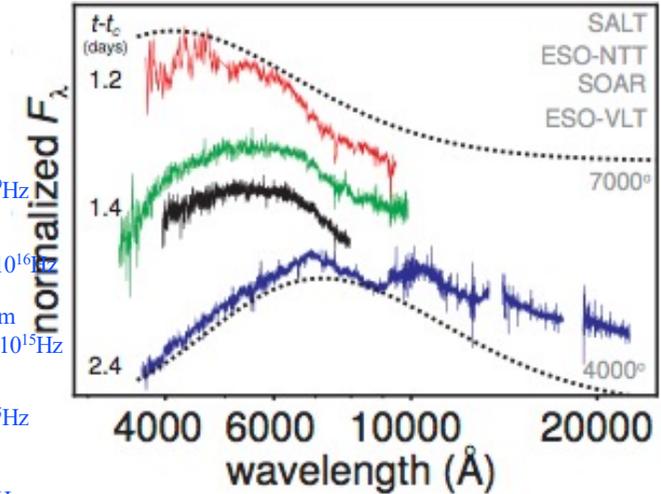
$10^{-11} \sim 10^{-8}$  m  
 $3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{19}$  Hz

$10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7}$  m  
 $0.75 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{16}$  Hz

$4 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7}$  m  
 $0.4 \times 10^{15} \sim 0.8 \times 10^{15}$  Hz

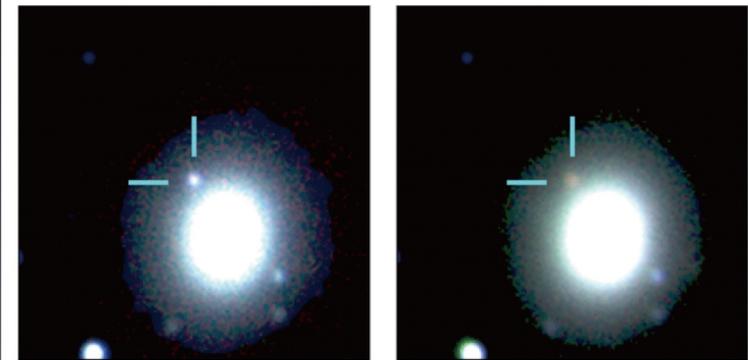
$7 \times 10^{-7} \sim 10^{-3}$  m  
 $3 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{15}$  Hz

$10^{-3} \sim 10^5$  m  
 $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^{11}$  Hz



2017.08.18-19

2017.08.24-25



Subaru/HSC z + IRSF/SIRIUS H, Ks

(Utsumi, MT et al. 2017, PASJ)



# 2017年8月17日に観測された 連星中性子星合体で放出された 重力波と電磁波信号



- 連星中性子星合体の初観測
  - »  $(1.36\sim 2.26)M_{\odot} + (0.86\sim 1.36)M_{\odot} \Rightarrow (2.73\sim 3.29)M_{\odot}$
  - » 40Mpc ~ 1.3億光年
- 重力波を起点とするマルチメッセンジャー天文学の始まり
- 連星中性子星合体とショートガンマ線バーストの関連
- 鉄より重い重元素合成を起こすr過程とそれに伴う合成された元素の放射性崩壊熱による電磁波放射（キロノバ）の観測
- 今までとは独立なハッブル定数の測定：
- 一般相対性理論の検証
  - » 重力波信号が、理論予言と1000サイクル以上で一致
  - » 重力波の速度と光の速度が $10^{-15}$ の精度で一致
  - » 等

## マルチメッセンジャー天文学

連星合体



重力波検出 (LIGO/Virgo/KAGRA)  
| 低遅延アラート(数分)



全天観測  
| 誤差領域 (数10–100 deg<sup>2</sup>)



Vera Rubin Observatory  
(Legacy Survey of Space and Time)  
| 南半球から見える広大な領域  
(約1.8万平方度)を高頻度で網羅

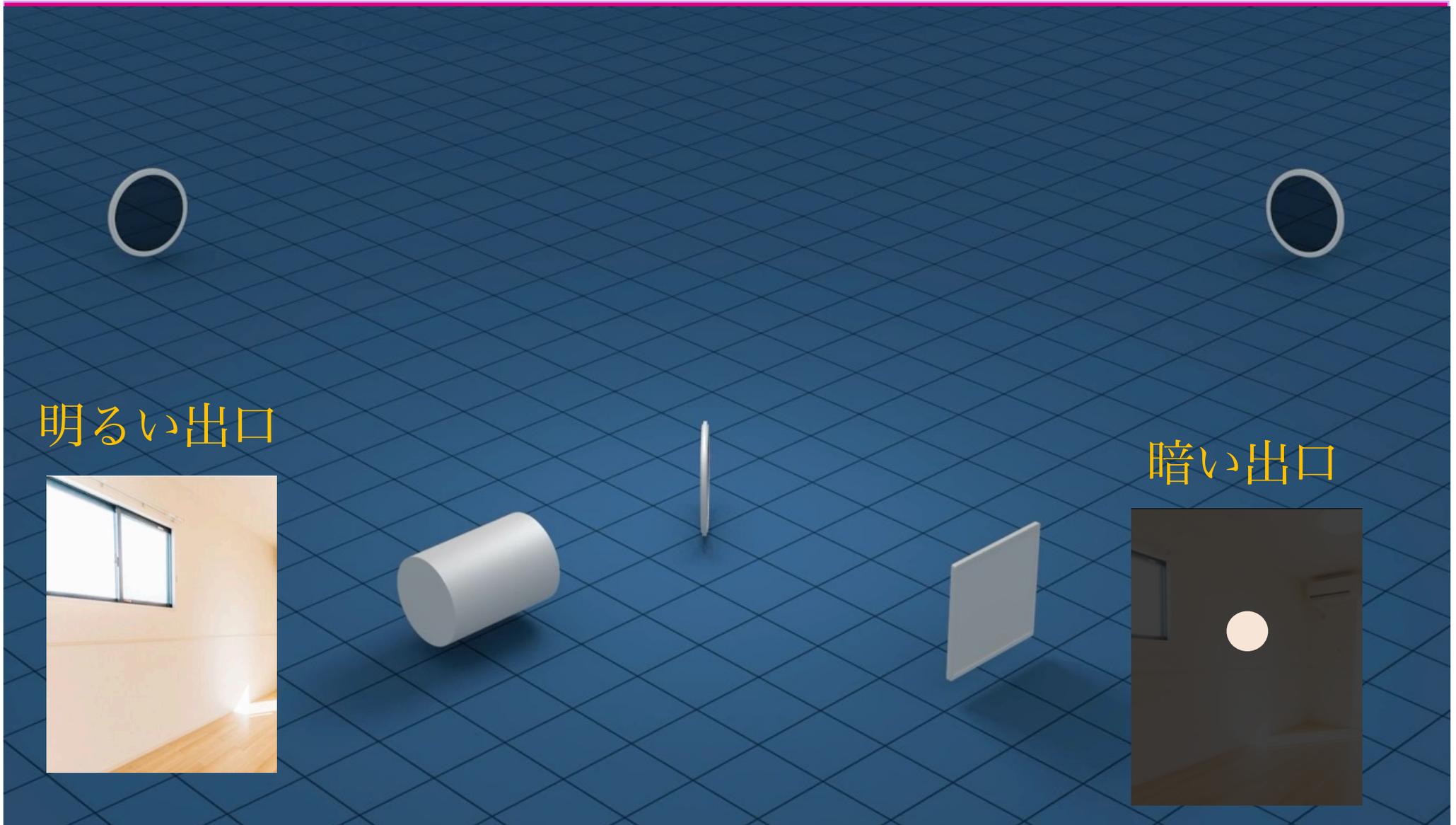


光学カウンターパート候補



大型望遠鏡で分光・詳細追観測

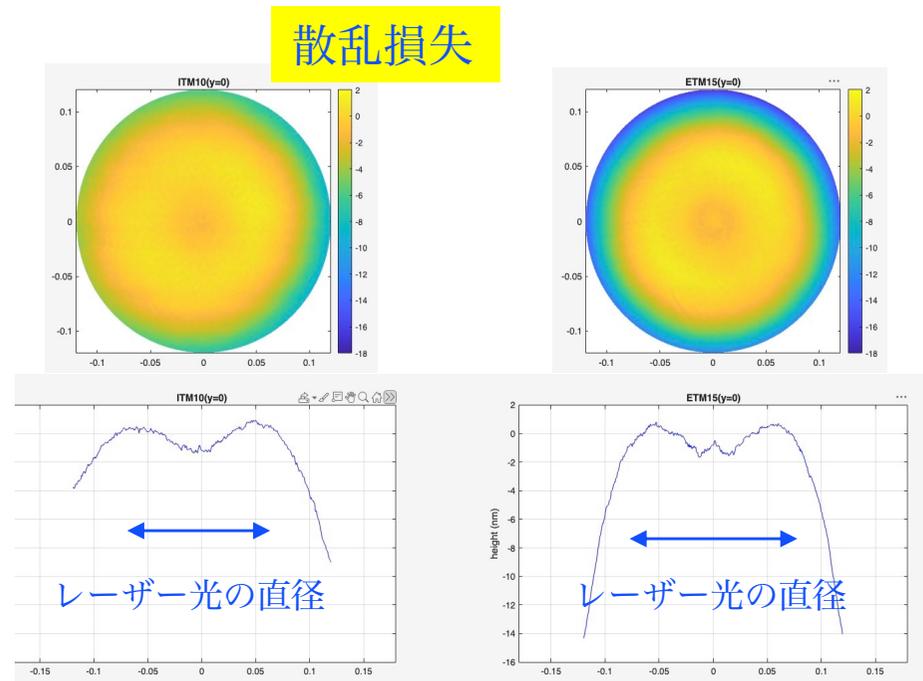
# 干渉計を使った微小変化の測定



# 干渉計の腕の長さの測定精度

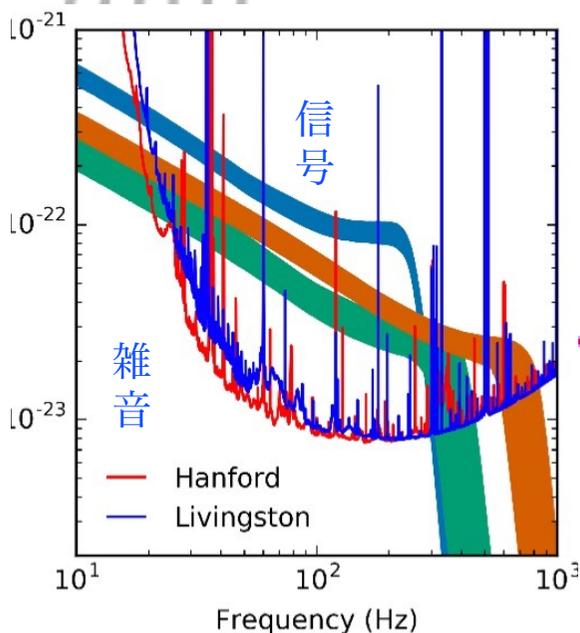


- 面偏光のレーザーを使って、反射光の位相に含まれる腕の光路長を測定する
- 腕の中に1MWのレーザー光 =  $10^{25}$ 個の光子
- 一個の光子は、腕の中を $\sim 300$ 回往復
- 位相のずれを使って光子1個が測れる長さの精度 $\sim 10^{-6}$  m / 300
- 多数の光子の情報を合わせると、統計的に  $1/\sqrt{\text{光子の数}}$
- $\Rightarrow$  腕の長さの測定精度は  $10^{-20}$  m  
 $\sim$  水素原子の大きさの100億分の1
- 鏡の表面形状 ( $\sim 10^{-9}$  m) は、腕の中に溜まるレーザー光の形と散乱ロスに影響するが、直接の長さの測定精度には影響しない

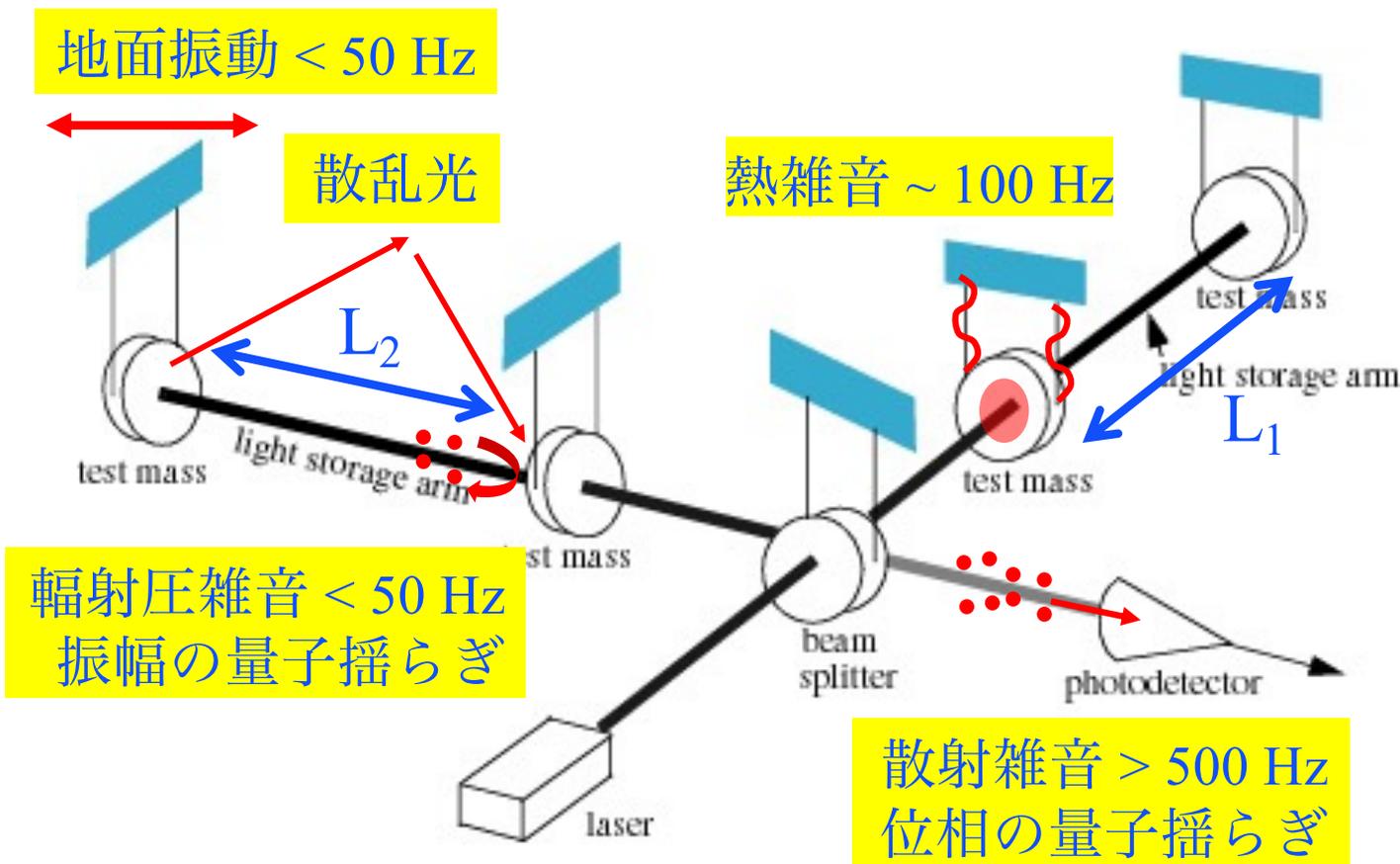


# 重力波干渉計の雑音

二つの腕の長さの差の厳密測定を妨げる要因



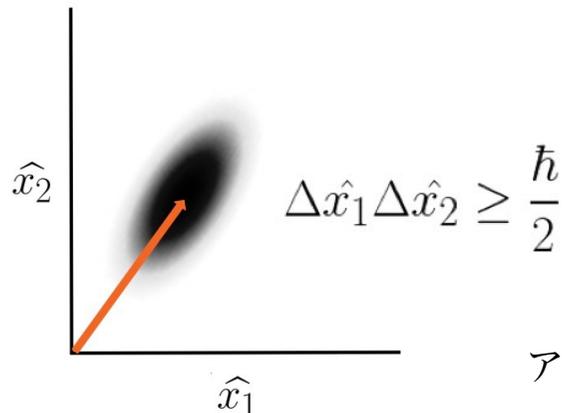
| 雑音源  | 雑音を下げるには    |
|------|-------------|
| 散乱雑音 | レーザーパワー     |
| 熱雑音  | 重い鏡、低温      |
| 地面振動 | 防振系、地震動     |
| 輻射圧  | 振動の不確実性を下げる |
| 散乱光  | 非反射の壁       |



# 雑音源に対する改良

|              | iLIGO     | aLIGO       |
|--------------|-----------|-------------|
| レーザーパワー (腕内) | 6W (15kW) | 60W (300kW) |
| 鏡の重さ         | 10kg      | 40kg        |
| 懸架系          | 一段振り子     | 4段振り子       |
| 量子雑音 (位相と振幅) |           | Squeezer    |
| 散乱光雑音        |           | 非反射の壁の追加    |

## 不確定性理論



JGW.

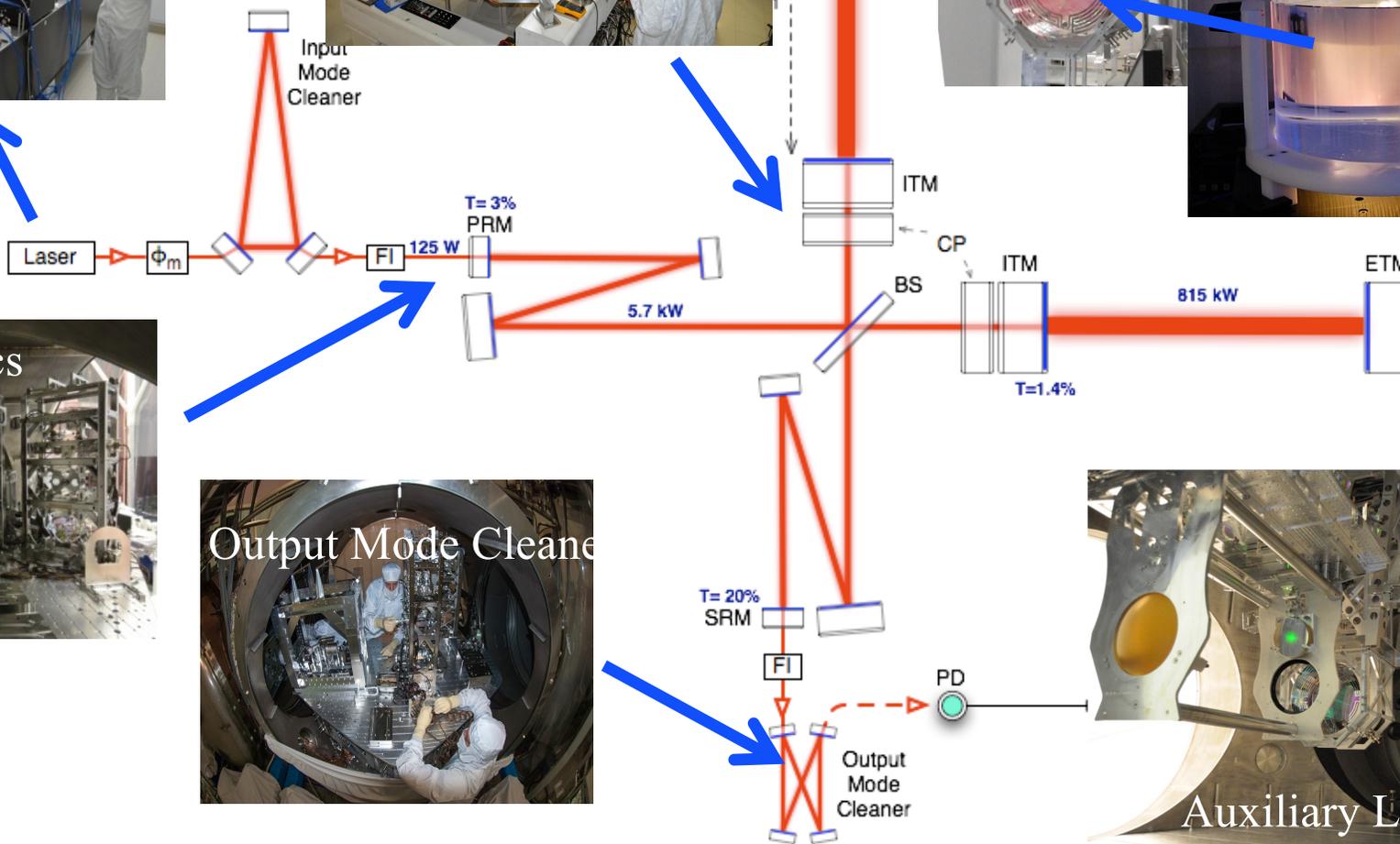
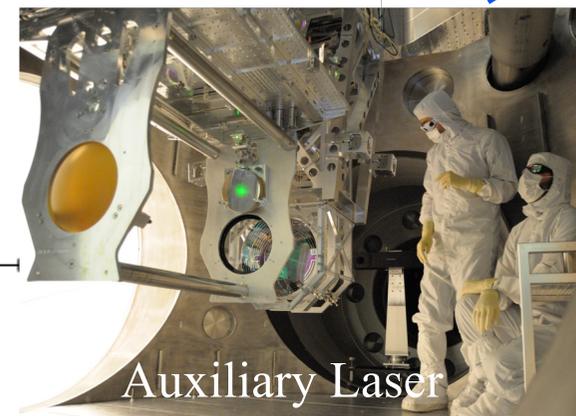
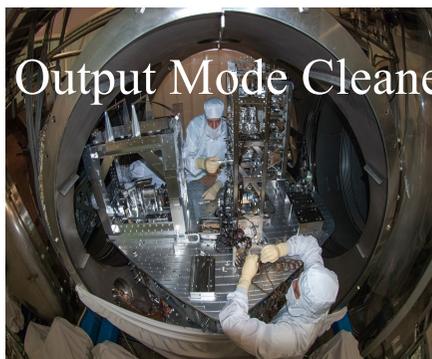
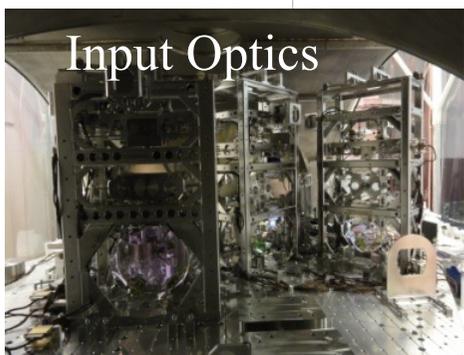
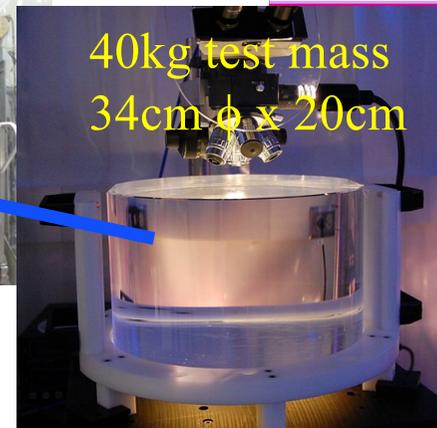
アストロ・アカデミア 2026年1

## 散乱光



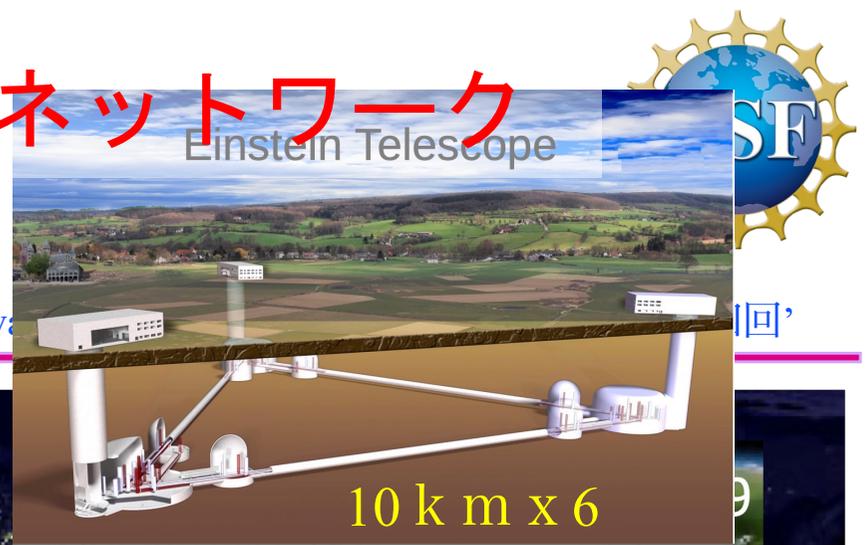


# Advanced LIGO in Pictures





# 重力波観測国ネットワーク



2015



GEO Hannover 600m  
LIGOの有力なメンバー



AdV, Cascina, 3 km

2017



LIGO-India Hingoli, 4km  
LIGOの一環として運営される

~2025



KAGRA

## LIGO Scientific Collaboration

- 共同研究者 1600人
- 20 か国
- 総費用 ~1.5G\$ (~1800億円)

## Virgo Collaboration

- 共同研究者 800人
- 6か国
- 総費用 ~0.42G€ (~600億円)

## KAGRA Collaboration

- 共同研究者 440人
- 14か国
- 建設費 ~164億円

- 保守的な設計
- 稼働する事を重視
- 地表で常温

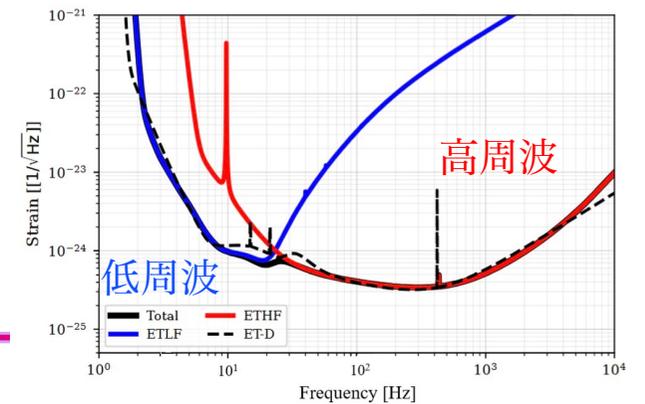
- 次の世代に向けての設計
- 地下で低温⇒雑音の低減



- 東大宇宙線研を中心に、高エ研、天文台等100余りの研究機関が参加
- 韓国台湾中国等、国際的プロジェクト
- 岐阜県飛騨市神岡鉦山（ニュートリノ測定器カミオカンデの側）
- 3キロの基線長の干渉計
- 地下に作る事と高い防振装置を採用する事で地面震動の影響を軽減
- 鏡を低温にする事で熱雑音を軽減
- 2023年末からLIGO、Virgoの重力波観測ネットワークに参加



# 色々な干渉計



| 干渉計                | 場所                    | 腕の長さ、様式           | 腕の温度      | 特徴   |
|--------------------|-----------------------|-------------------|-----------|--|
| LIGO               | アメリカ                  | 4km FP            | 常温        | 保守的な設計                                     |
| Virgo              | イタリア                  | 3km FP            | 常温        | 低周波に強い、高い8段振り子の防振計                         |
| KAGRA              | 日本                    | 3km FP<br>地下      | 低温        | 地震動が静かな神岡鉱山の地下、熱雑音を抑える低温                   |
| GEO                | ドイツ                   | 600m Delay Line   | 常温        | 将来を目指した新技術の開発、aLIGOの技術の基礎                  |
| LIGO-India         | インド                   | 4km FP            | 常温        | aLIGOのコピー、LIGOと同じ感度の干渉計が離れた場所にある事で、重力波源の特定 |
| Cosmic Explorer    | アメリカ                  | 40km,20km FP      | 常温        | 保守的な設計、10倍の感度で宇宙の果てまで見る                    |
| Einstein Telescope | ? イタリア<br>オランダ<br>ドイツ | 三角形の10km FP<br>地下 | 低温と<br>常温 | 低周波に特化した低温干渉計と高周波に特化した常温干渉計                |



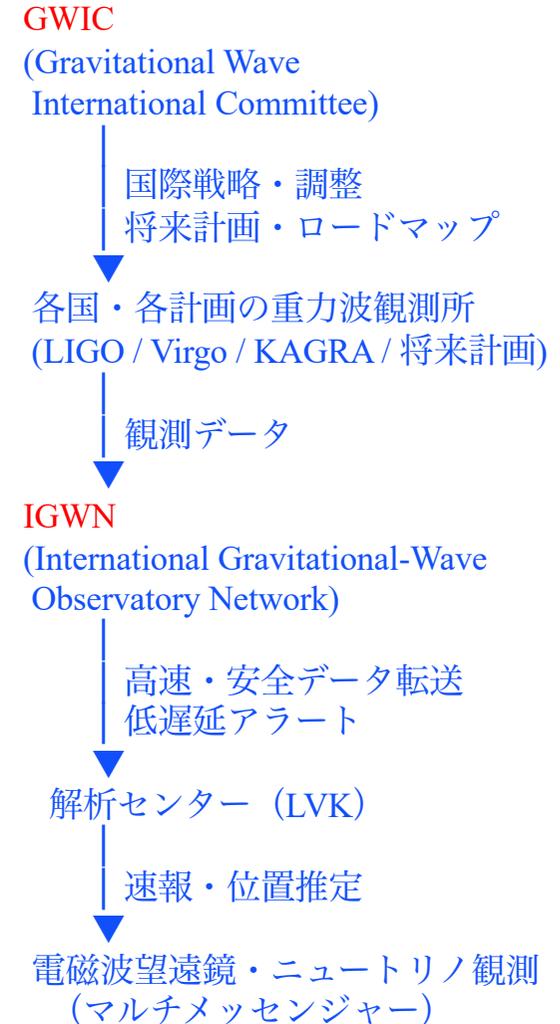
# 重力波干渉実験グループの 国際協力

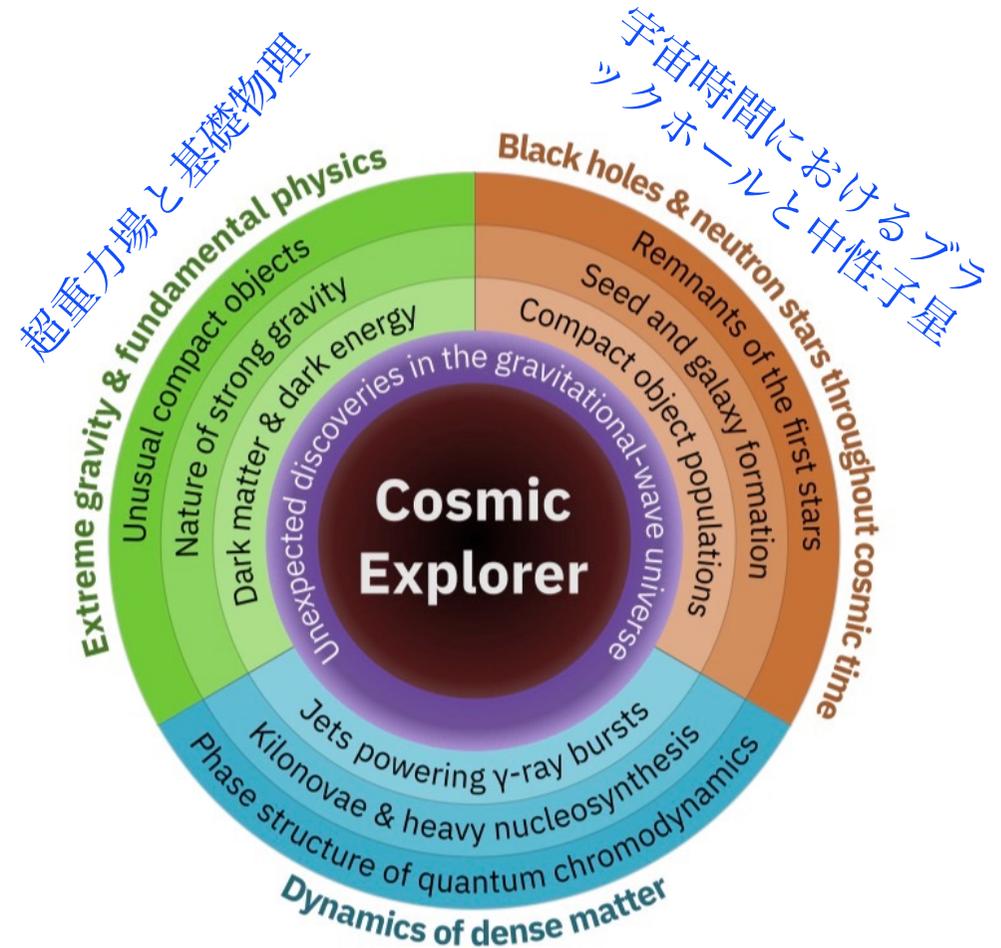
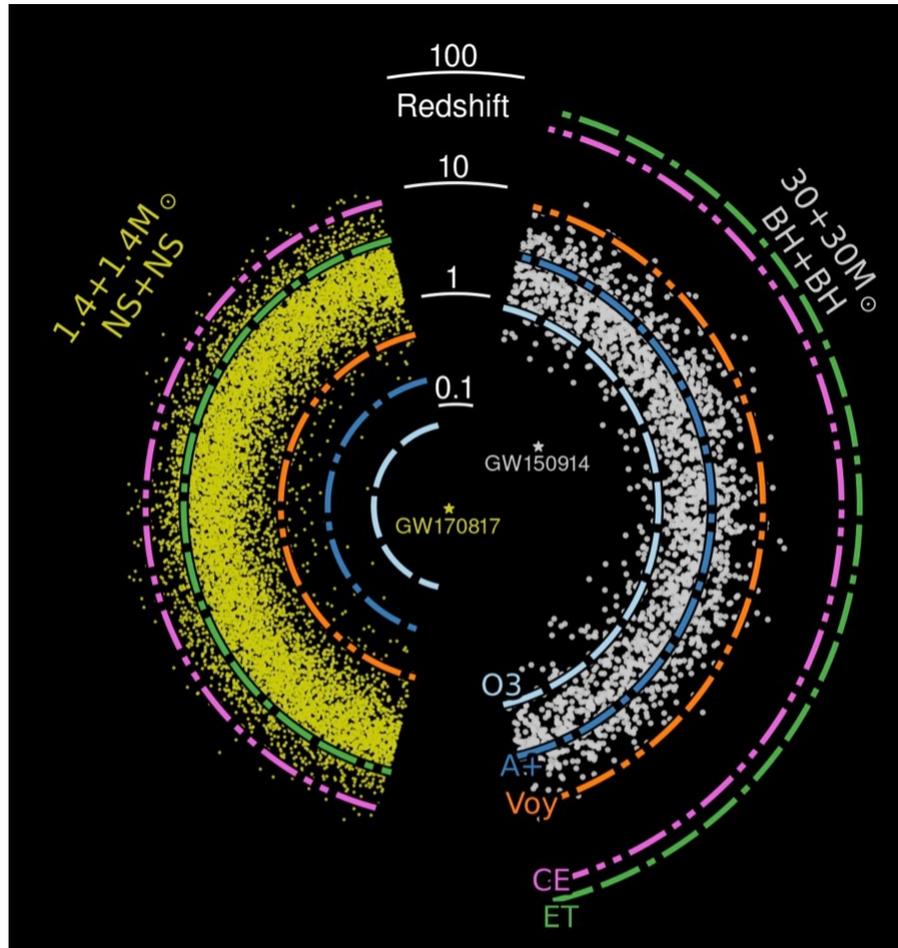


ChatGPT 5.2により作成

## GWIC と IGWN の違い

| 項目    | GWIC                                       | IGWN   |
|-------|--|--|
|       | 「世界の重力波研究をどう進めるか」を議論・調整する場                 |  |
| 正式名称  | Gravitational Wave International Committee | International Gravitational-Wave Observatory Network |
| 本質    | 国際委員会 (組織)                                 | 通信ネットワーク (インフラ)                                      |
| 役割    | 国際調整・戦略・ロードマップ                             | データ転送・低遅延アラート  |
| 主な活動  | 各国計画の調整、将来構想の議論                            | LIGO/Virgo/KAGRA を結ぶ高速通信                             |
| 科学データ | ✗ 扱わない                                     | ✔ 扱う (リアルタイム)  |
| 例えると  | 政策・司令塔                                     | 神経網・血管   |





$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emit}}{\lambda_{emit}}$$

- $z > 0$ : 赤方偏移 (波長が伸びる)
- $z < 0$ : 青方偏移 (波長が縮む)

- 距離・年代: 銀河の  $z$  から宇宙の過去を探る
- 速度: ドップラー効果で運動を測定
- 重力: 一般相対論の検証 (重力赤方偏移)

高密度の物理



# Cosmic Explorer Timeline

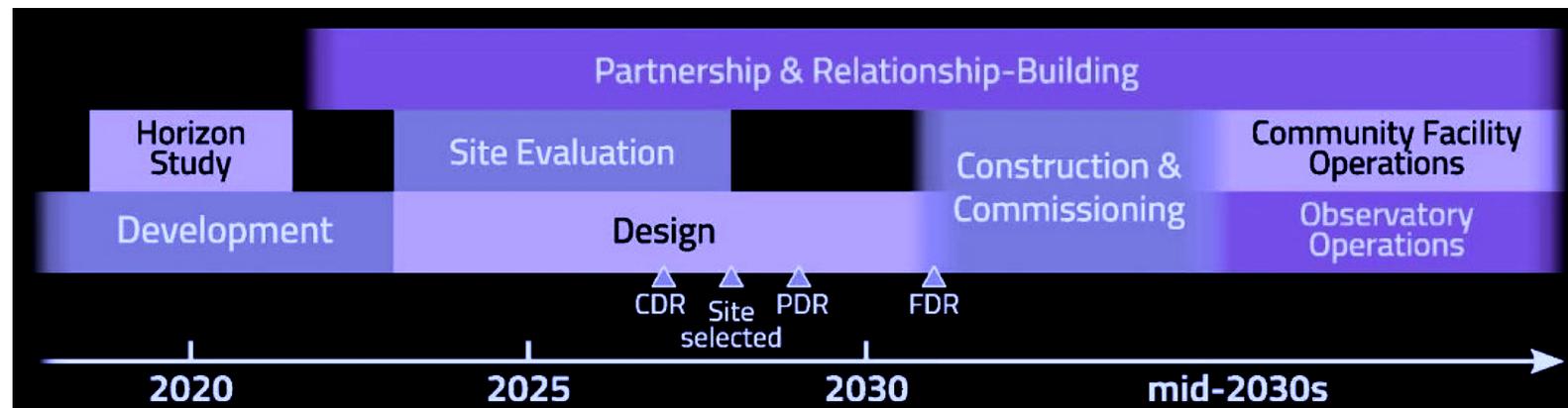


Stefan Ballmer @ 2025 LVK

● Plan for Project evolution

- Conceptual Design (3+years)
- Preliminary Design ~\$75M (2-3 years)
- Final Design ~\$100M (2 years)
- Construction ~\$1-2B (5 years)
- Operations ~\$60M / year (50 years?)
- Decommissioning/Divestment

| LIGO A#  | Cosmic Explorer  |
|--|--|
| 4 km long arms   | 40 km and maybe 20 km long arms  |
| 1.5 MW arm power   | 1.5 MW arm power   |
| 10 dB frequency dependent SQZ  | 10 dB frequency dependent SQZ  |
| 100 kg fused silica test mass  | 440 kg fused silica test mass  |
| Redesigned QUADs, 160 cm total length, 400 kg total mass, 1.6 GPa fiber stress | Nominally QUADs, 4 m total length, ~2000 kg total mass, 1.6 GPa fiber stress |
| 2× reduction in CTN over A+ coating goal                                       | A+ coating goal  |
| Improved seismic isolation   | Improved seismic isolation   |
| 2 suppression of Rayleigh wave Newtonian noise                                 | 10× suppression of Rayleigh wave Newtonian noise                             |



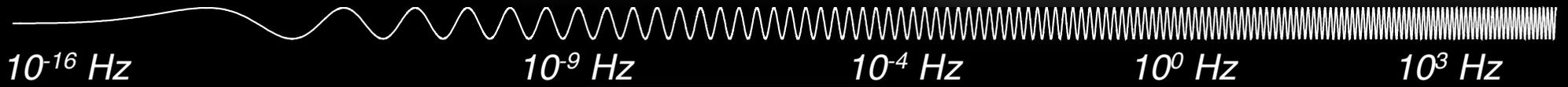
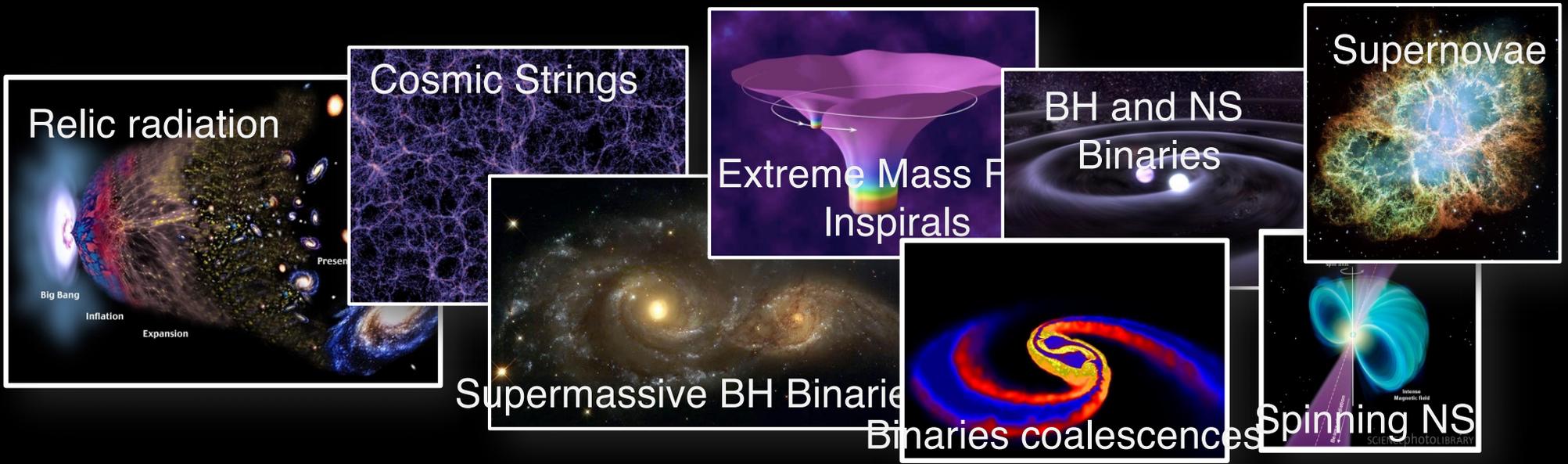
NSF RIG: [https://www.nsf.gov/publications/pub\\_summ.jsp?ods\\_key=nsf21107](https://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf21107)

# 設置場所についての認識



Consmic Exploerer チームは、土地や水や空と、そこに住む人々との固有のつながりを認識しています。私たちは、これらの場所を今迄大切にし、今も大切に守り、これからも守り続ける先住民コミュニティとのつながりとパートナーシップを育むことを約束します。私たちは、科学を行うやり方とそれが土地やそこに住む人々に及ぼす影響について責任がある事をしっかりと認識しています。

# The Gravitational Wave Spectrum

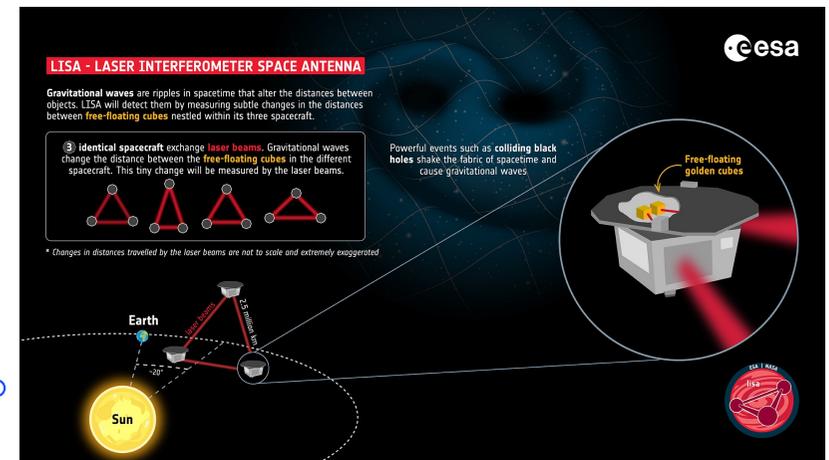


Inflation Probe      Pulsar timing      Space detectors      Ground interferometers



# おわりに

- 大勢の人達の100年にわたる努力で、やっと宇宙のさざなみを聞く事が出来ました。
- 地上の干渉計の改良と、新たな宇宙に浮かべる干渉計で、もっと面白い事探る事が出来ます。
- 400年前、ガリレオが開いた光を使った天文学に、今それに相当する様な大きなページが追加されました。今まで白黒画像で見ていた夜空を、総天然色で楽しむ事が出来る様になるでしょう。





# End of slides

---