

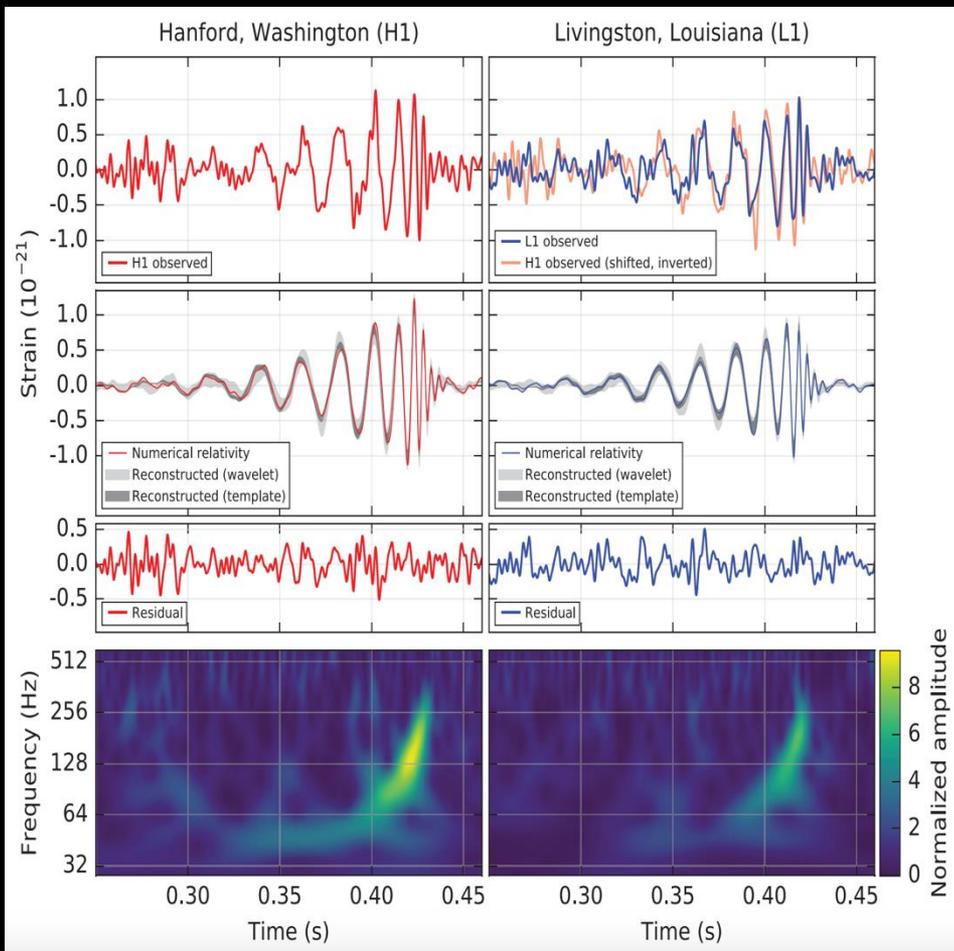
# 重力波で聞く 宇宙の極限現象

森崎宗一郎

東京大学宇宙線研究所

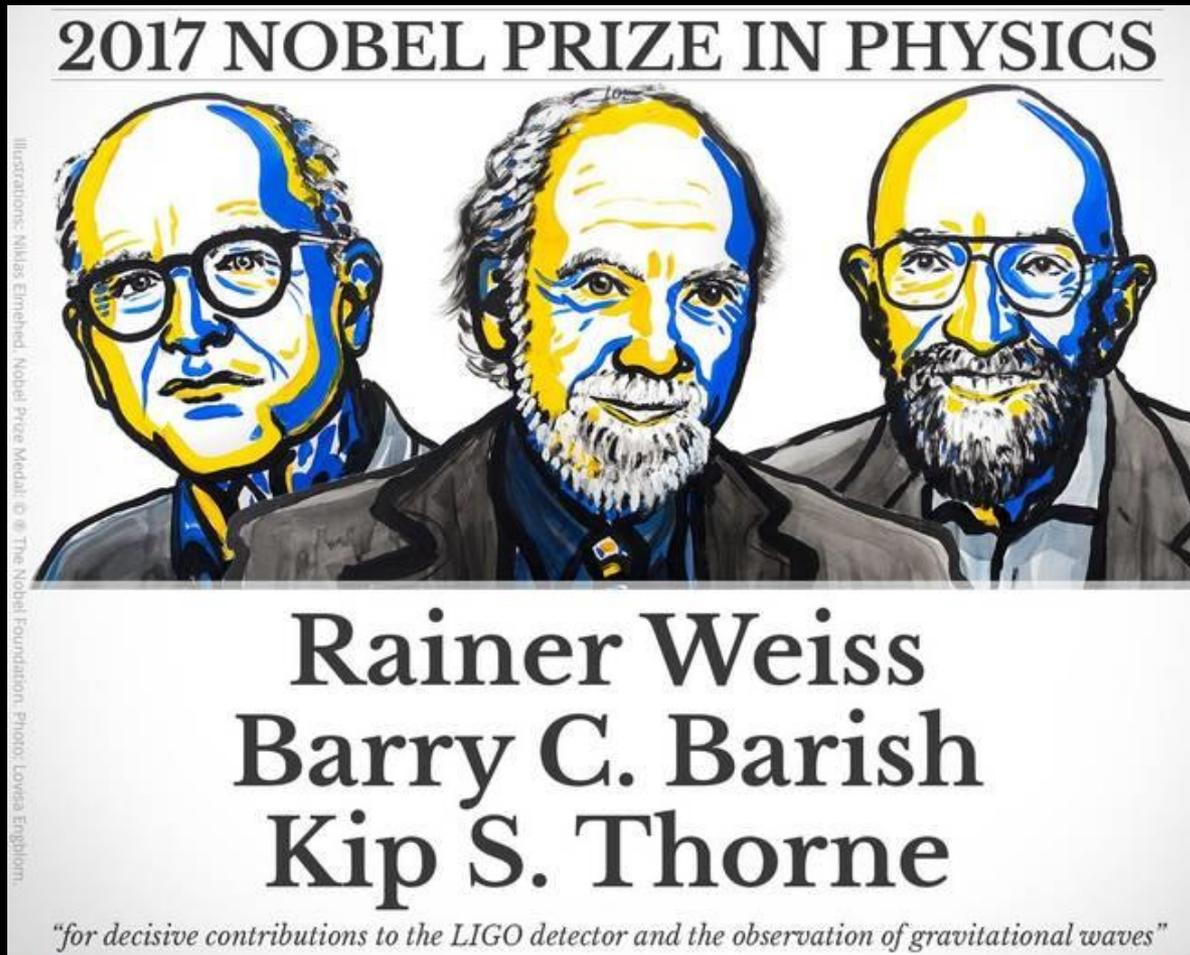
# 2015年9月に重力波が初観測された！

B. P. Abbott et al., PRL **116**, 061102 (2016)



アメリカの**LIGO**検出器により  
観測された重力波

2015年9月に重力波が初観測された！



レーザー干渉計**LIGO**を用いた  
重力波観測への多大なる貢献

# 2020年2月に日本のKAGRAも観測を開始！

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/archives/3321>より転載



岐阜・神岡にある  
KAGRA重力波検出器



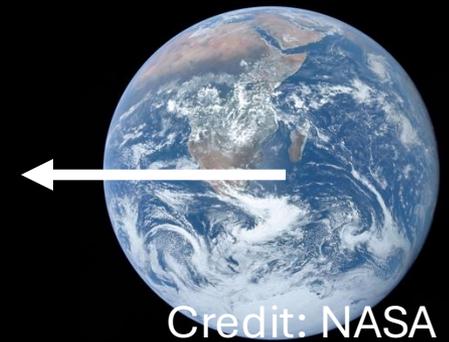
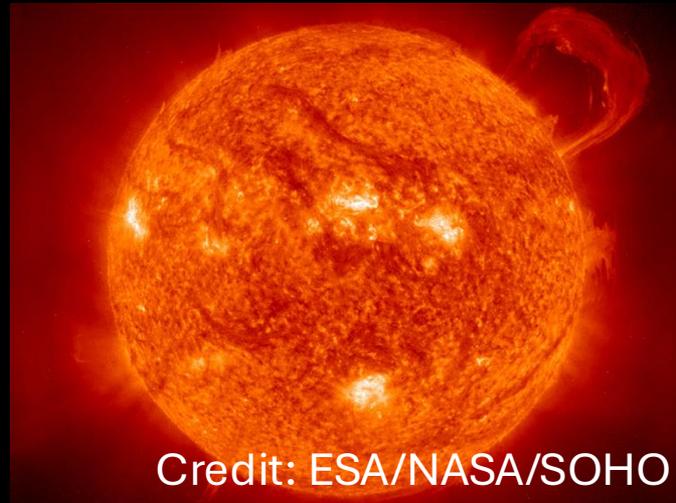
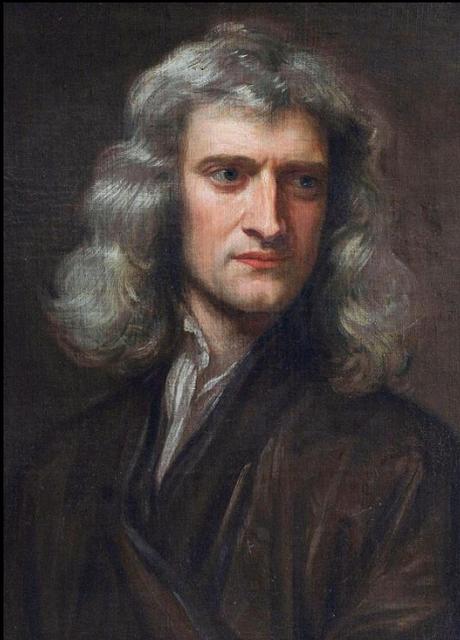
観測開始時のデータ解析棟

重力波って何？

重力とは？

# ニュートンの万有引力理論

質量のある物体間に引力が働く



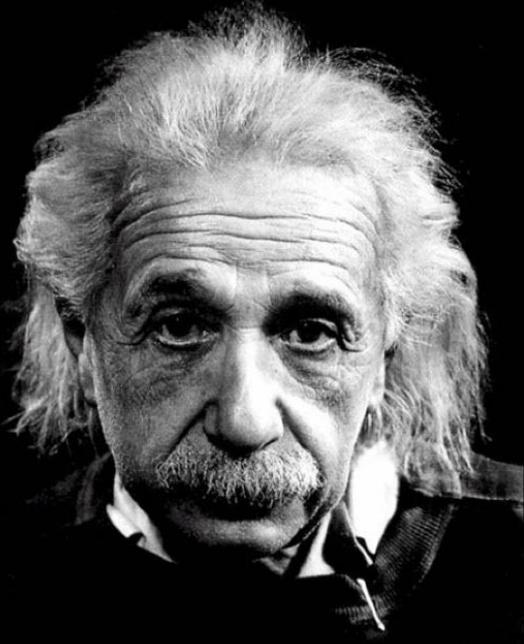
惑星は太陽に引っ張られて  
公転運動する。

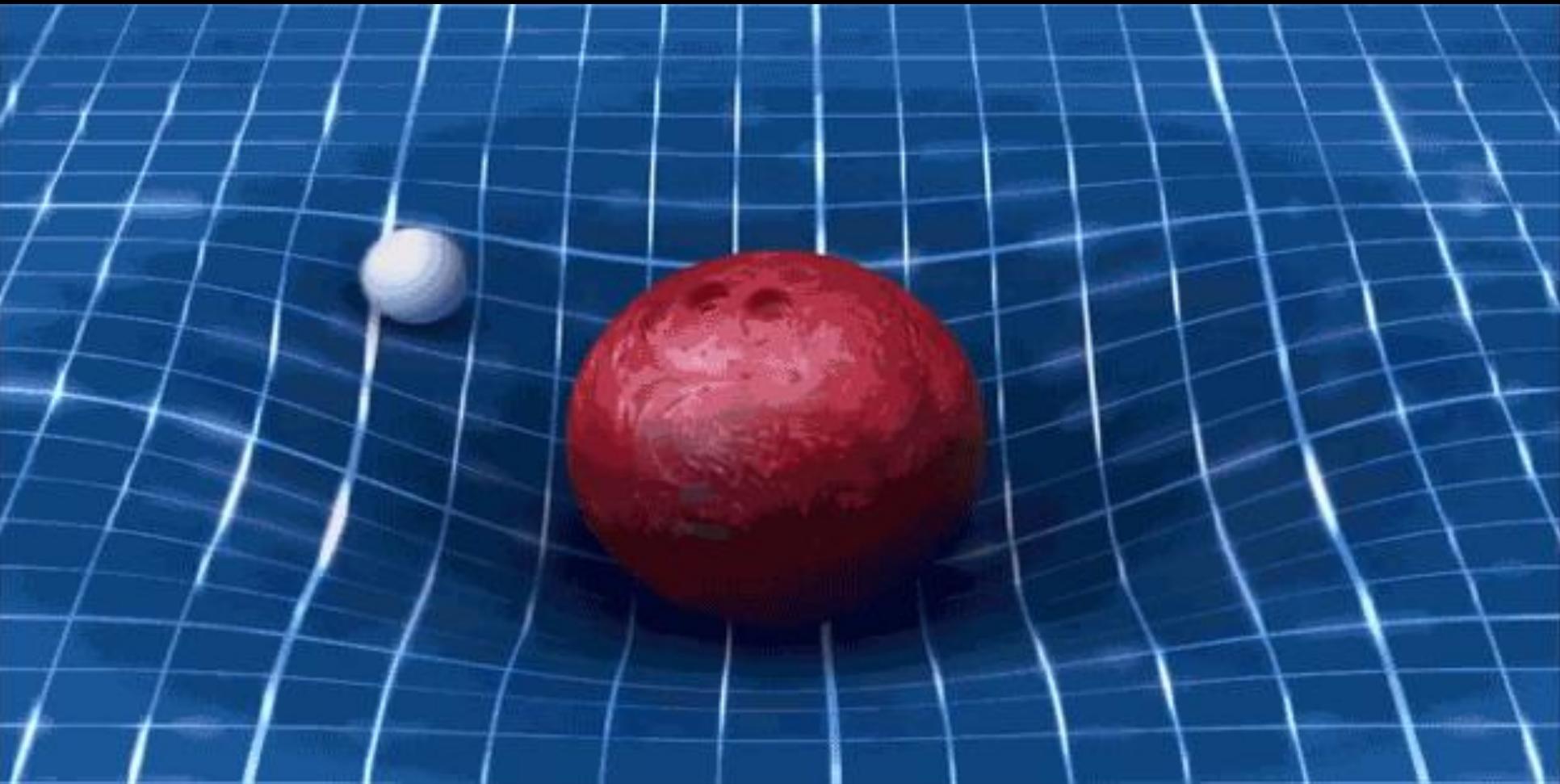
# アインシュタインの一般相対性理論

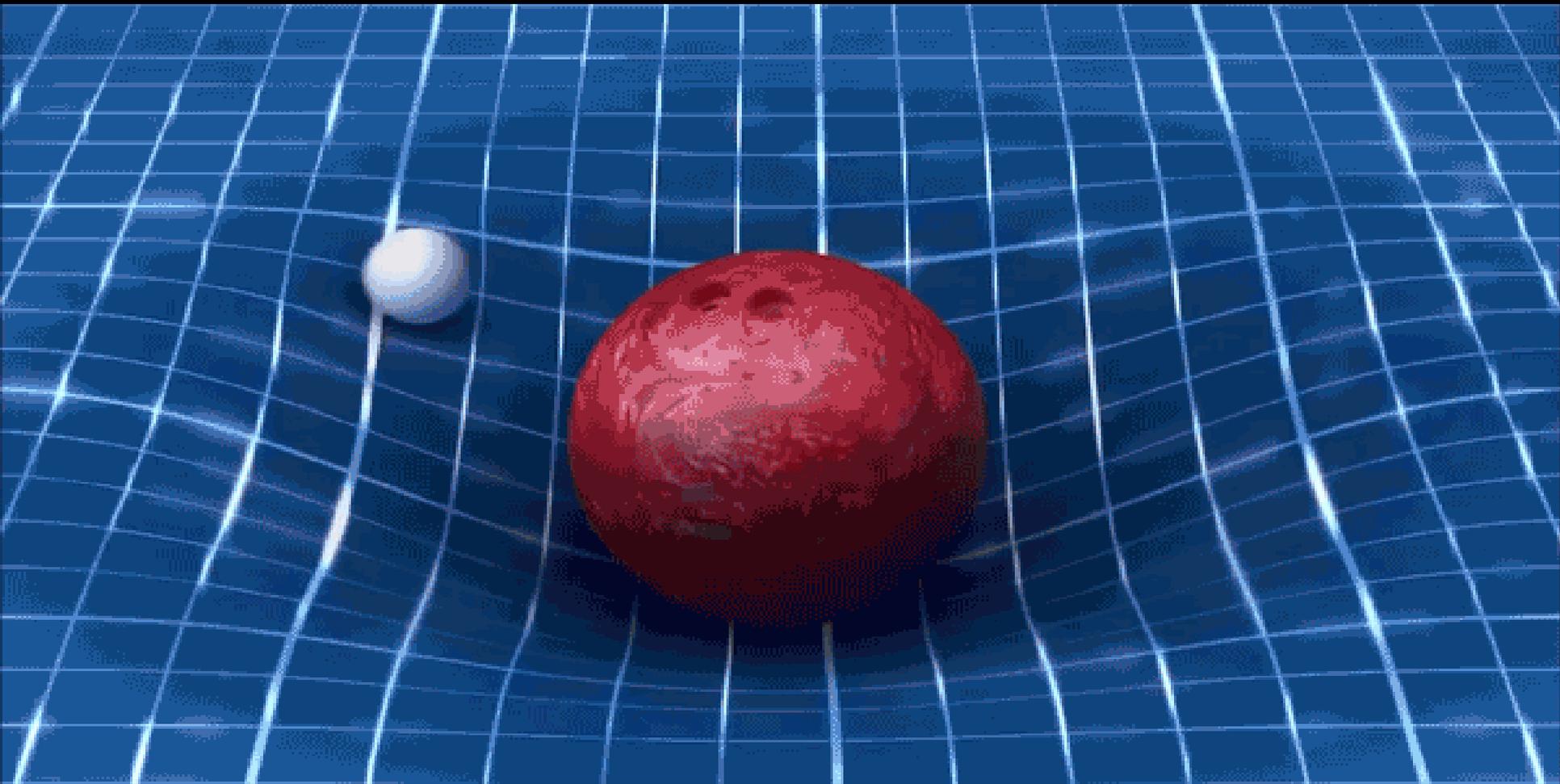
**重力は時空の歪み**

**質量を持った物体は  
周りの時空を歪ませる**

**物体は歪んだ時空を  
真っ直ぐ進む**





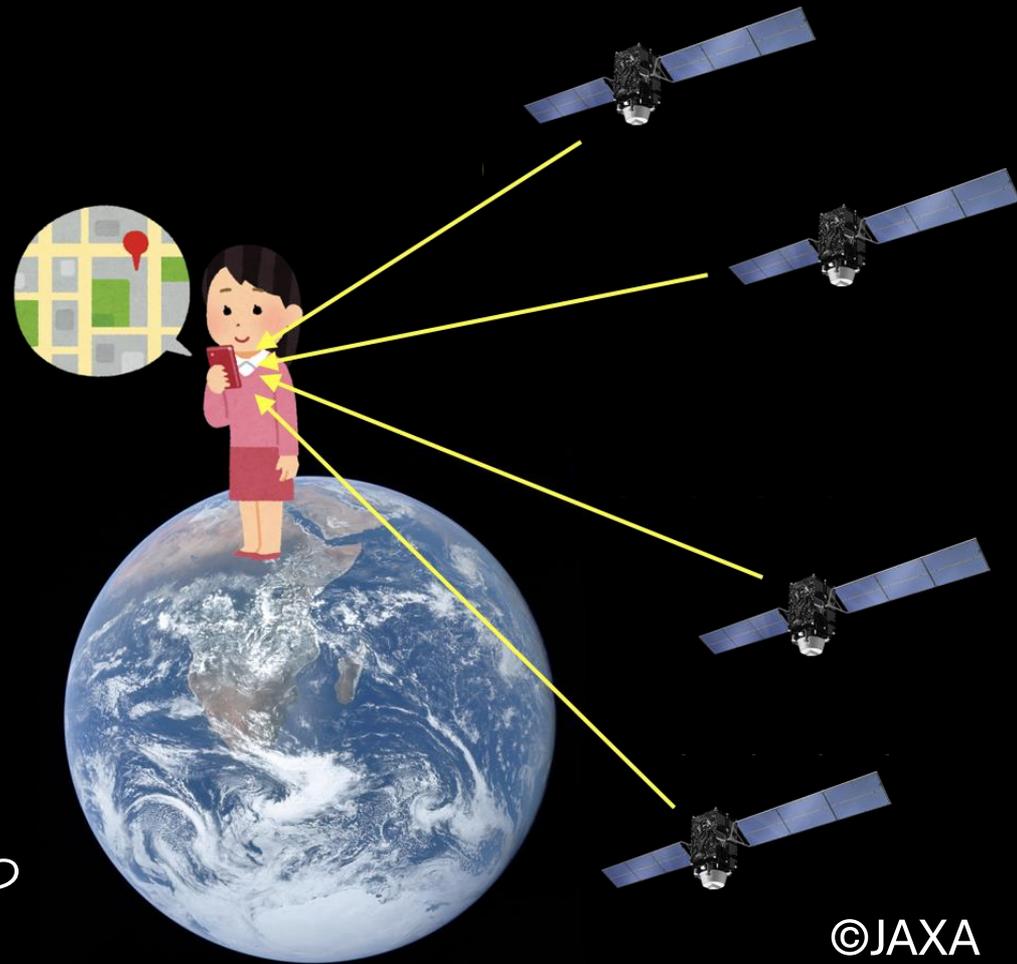


# GPSが使えるのも一般相対性理論のおかげ！

各衛星が  
衛星の時刻と位置を  
電波で伝える。

電波は光速で伝わるので  
電波を受信した時刻との  
時間差から  
衛星までの距離がわかる。

複数の衛星からの距離から  
自分の位置がわかる。



©JAXA

# GPSが使えるのも一般相対性理論のおかげ！

重力の強いところでは  
時間がゆっくり進む。



地上の時計は  
衛星（高度2万 km）の時計より  
**100億分の5倍**だけ遅い。

衛星で600秒経つと  
地上で599.9999997秒  
→ **100m**のずれ！



一般相対性理論を考慮して  
正しい位置情報になる！

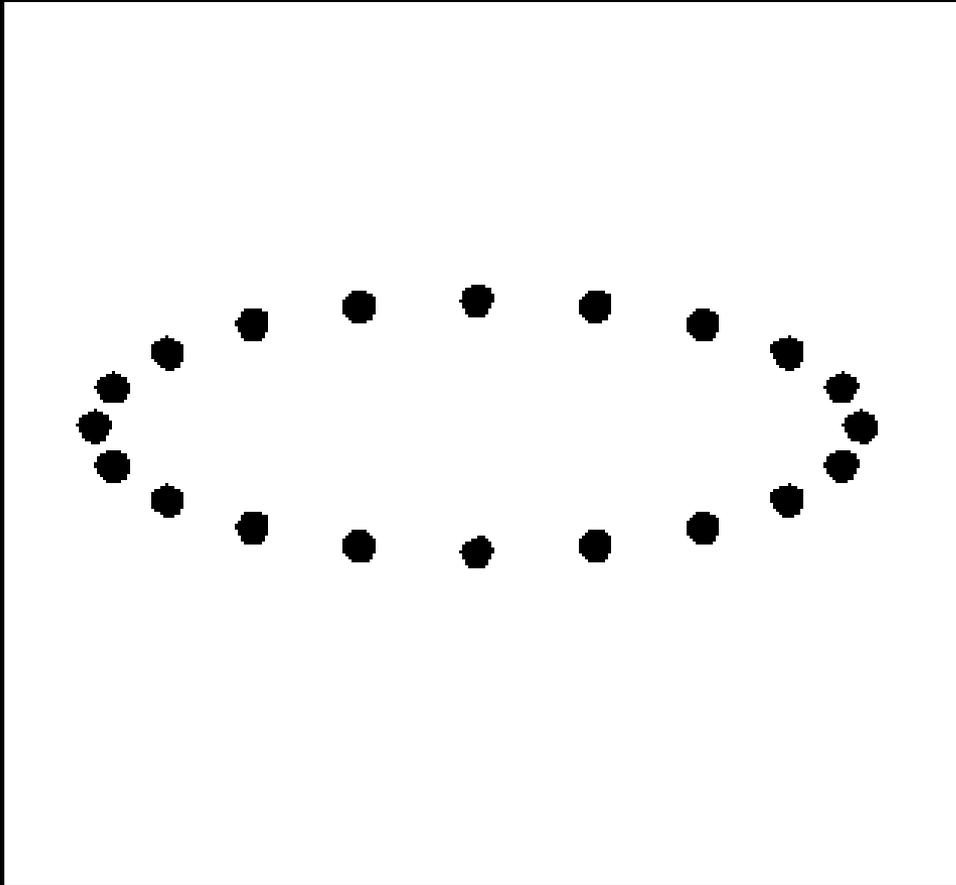


# 重力波とは

- 時空の歪みが伝わっていく現象
- 物体の運動から発生する  
(いくつか条件がある)
- 光速で伝わる
- ほとんどなんでもすり抜ける

どうやって観測するの？

# 重力波が通ると何が起こる？

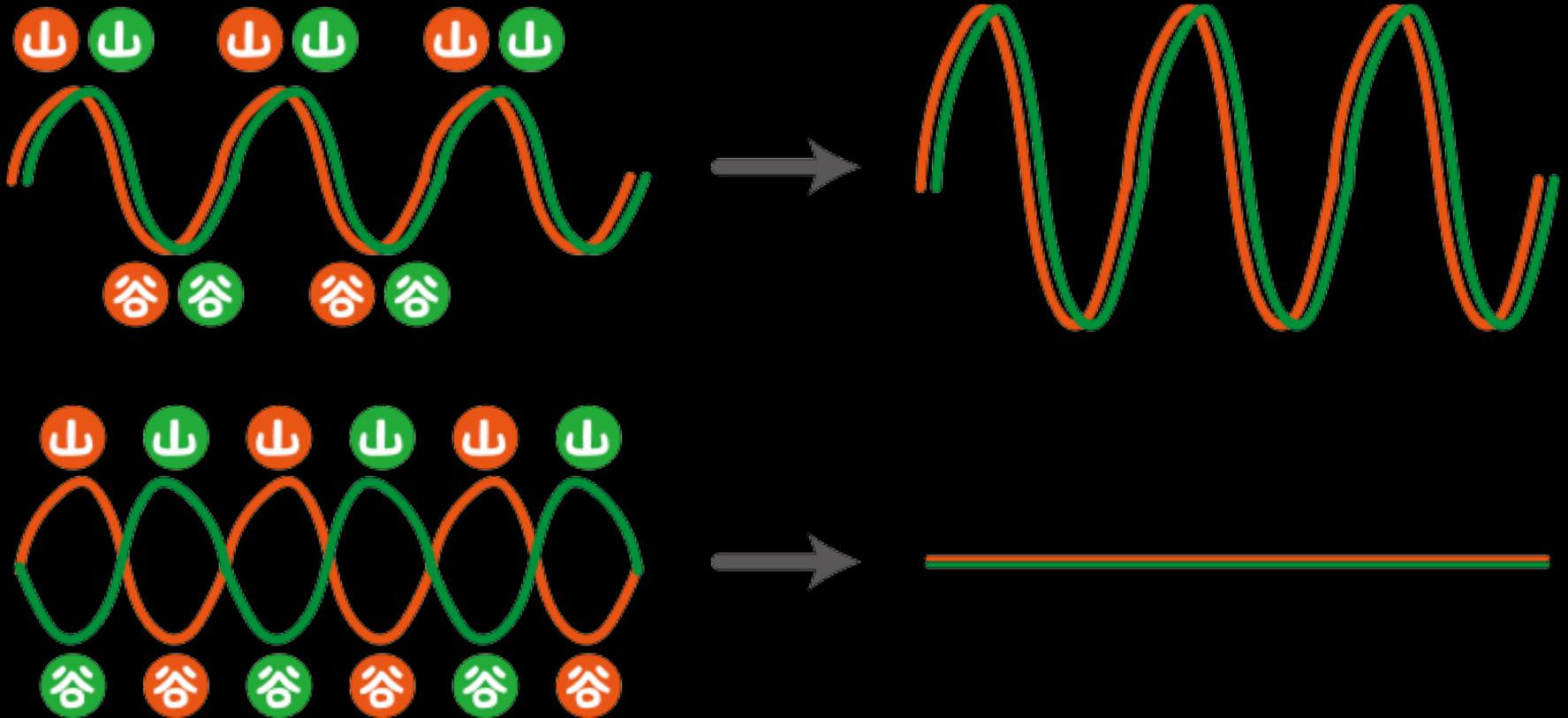


物体間の距離が  
伸び縮みする。

直交する二方向のうち、  
片方を伸ばし、  
もう片方は縮ませる。

この特徴的な距離の  
変動を見れば重力波を  
検出できる！

# 干渉



2つの波が足合わさると、山と谷が重なり合って、**強めあったり弱めあったり**する。

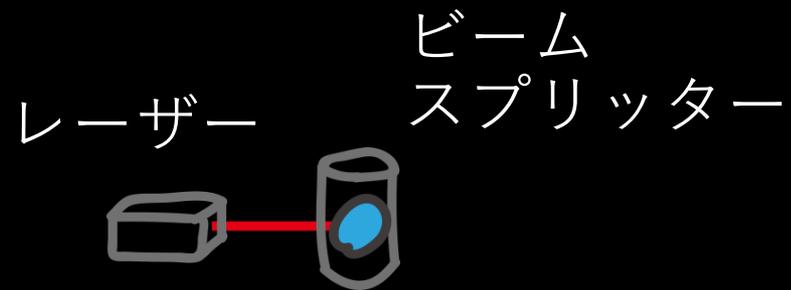
# マイケルソン干渉計

# マイケルソン干渉計

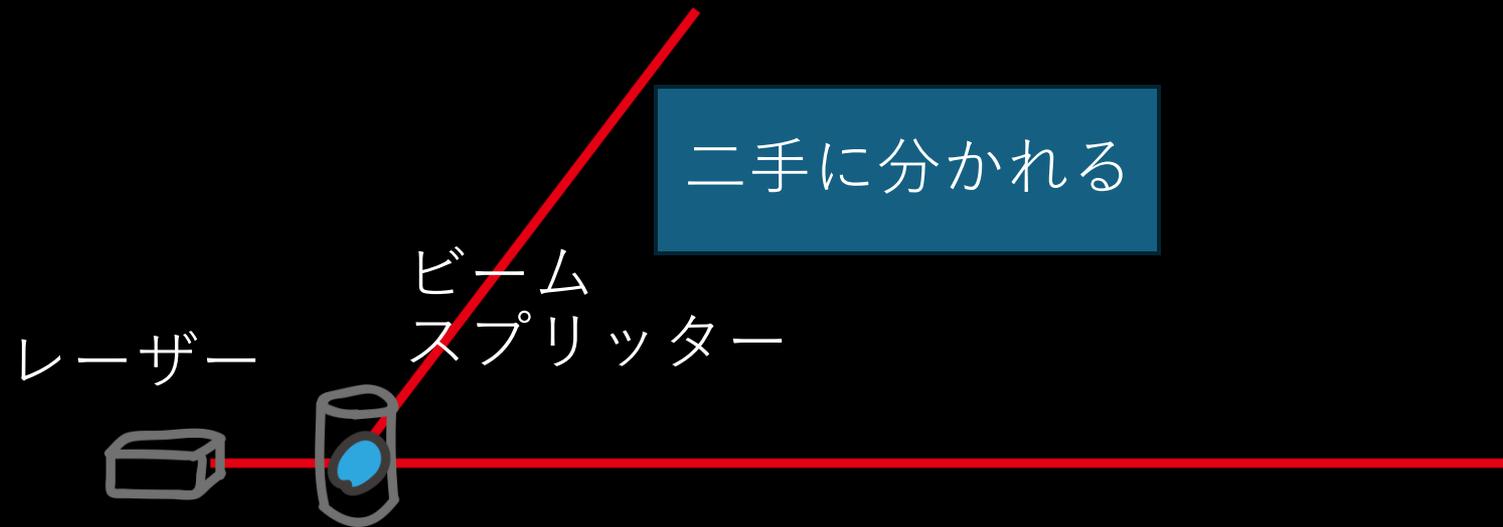
レーザー



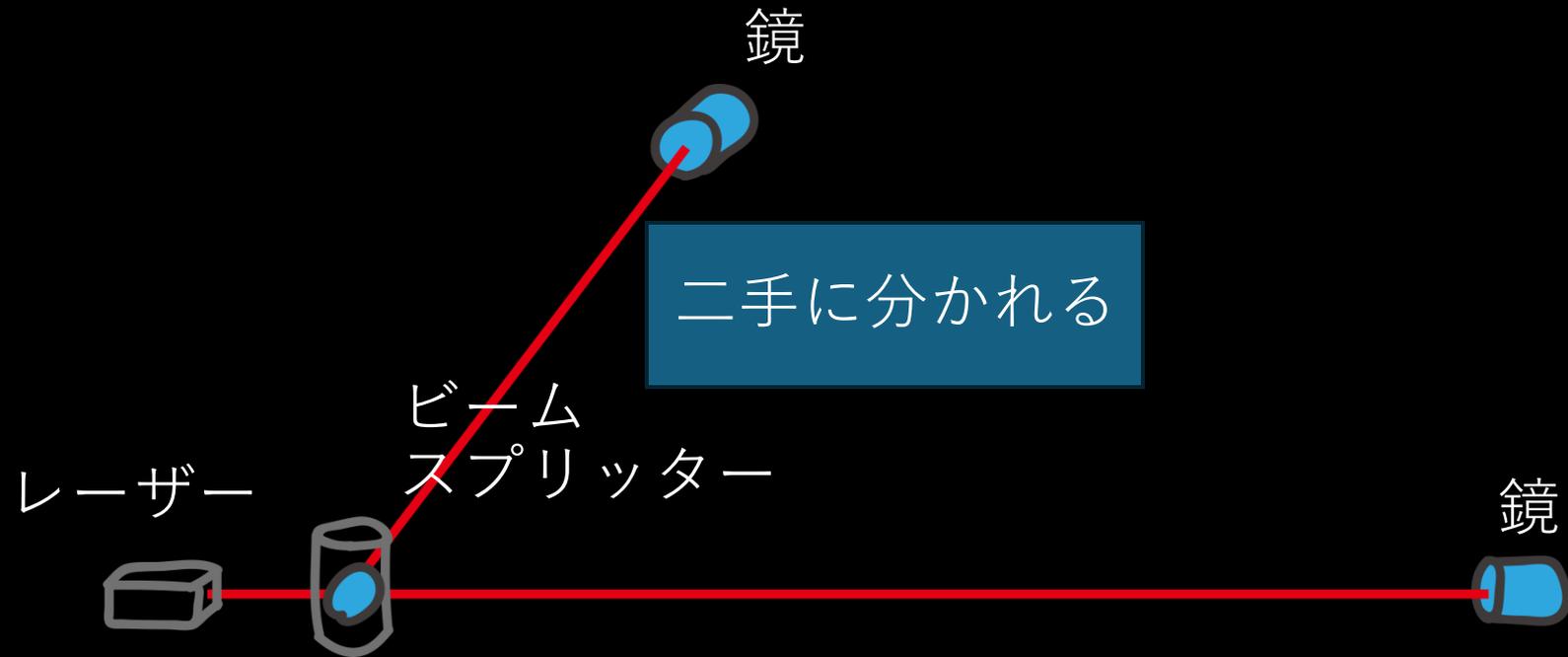
# マイケルソン干渉計



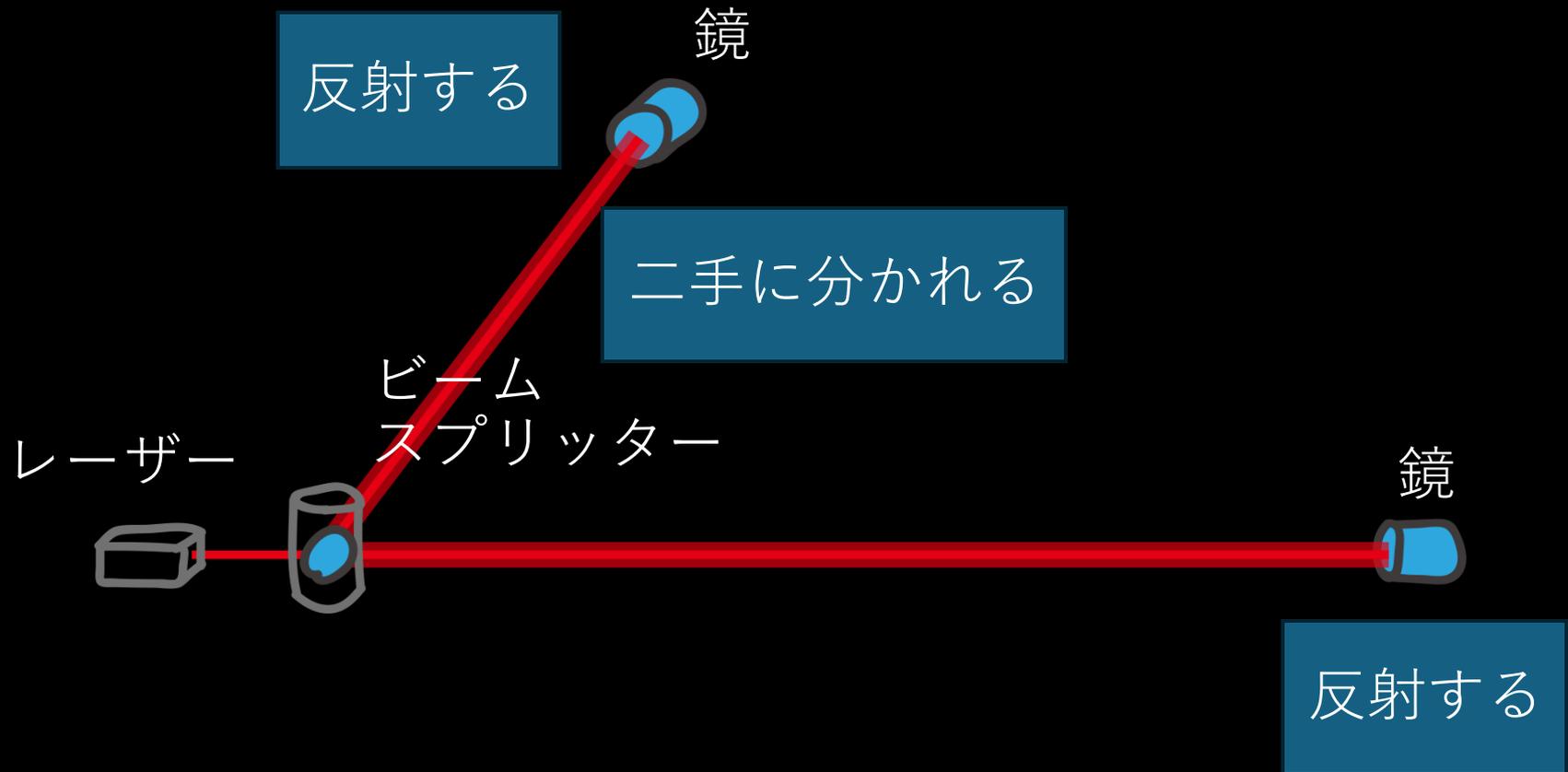
# マイケルソン干渉計



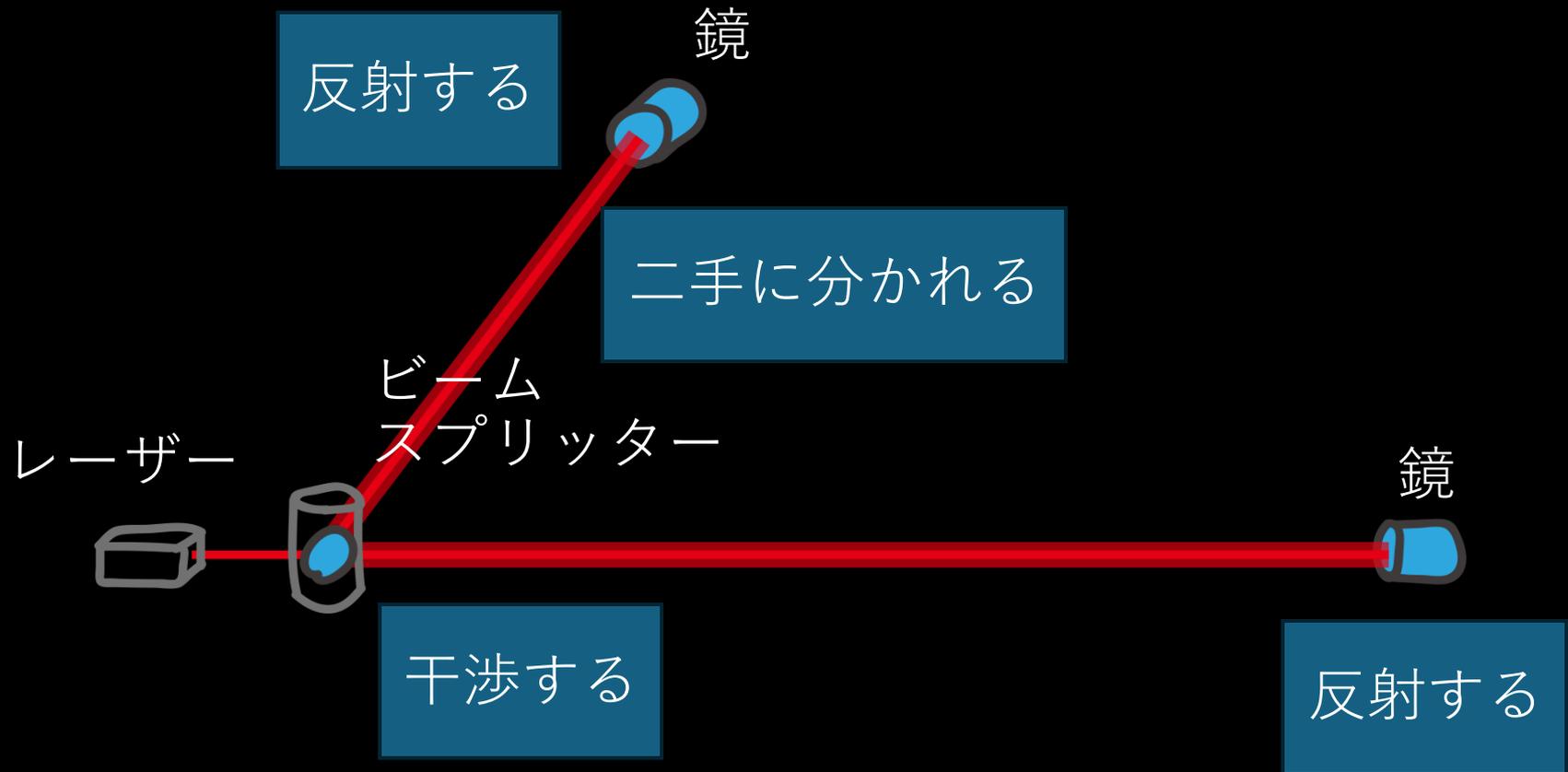
# マイケルソン干渉計



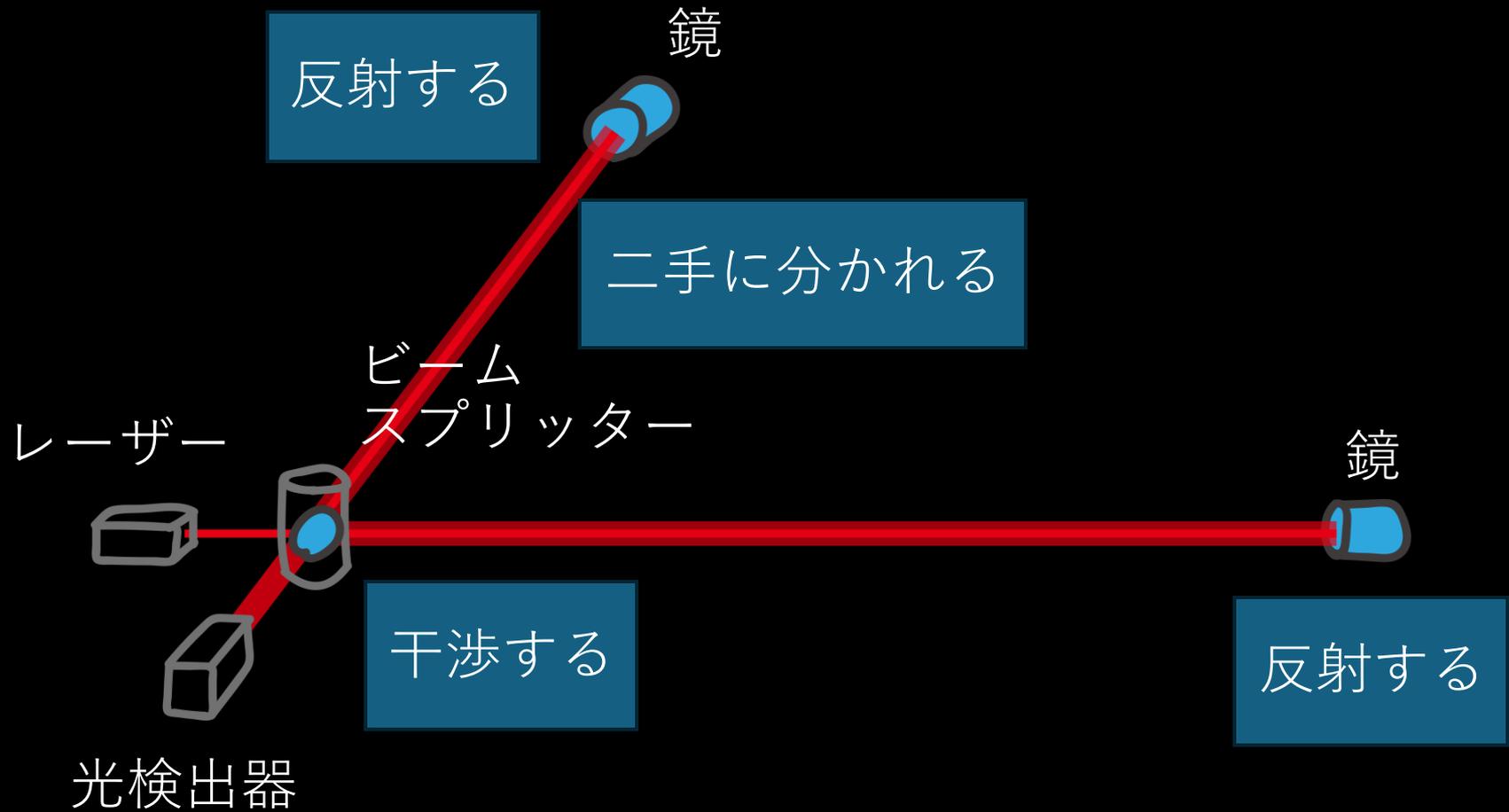
# マイケルソン干渉計



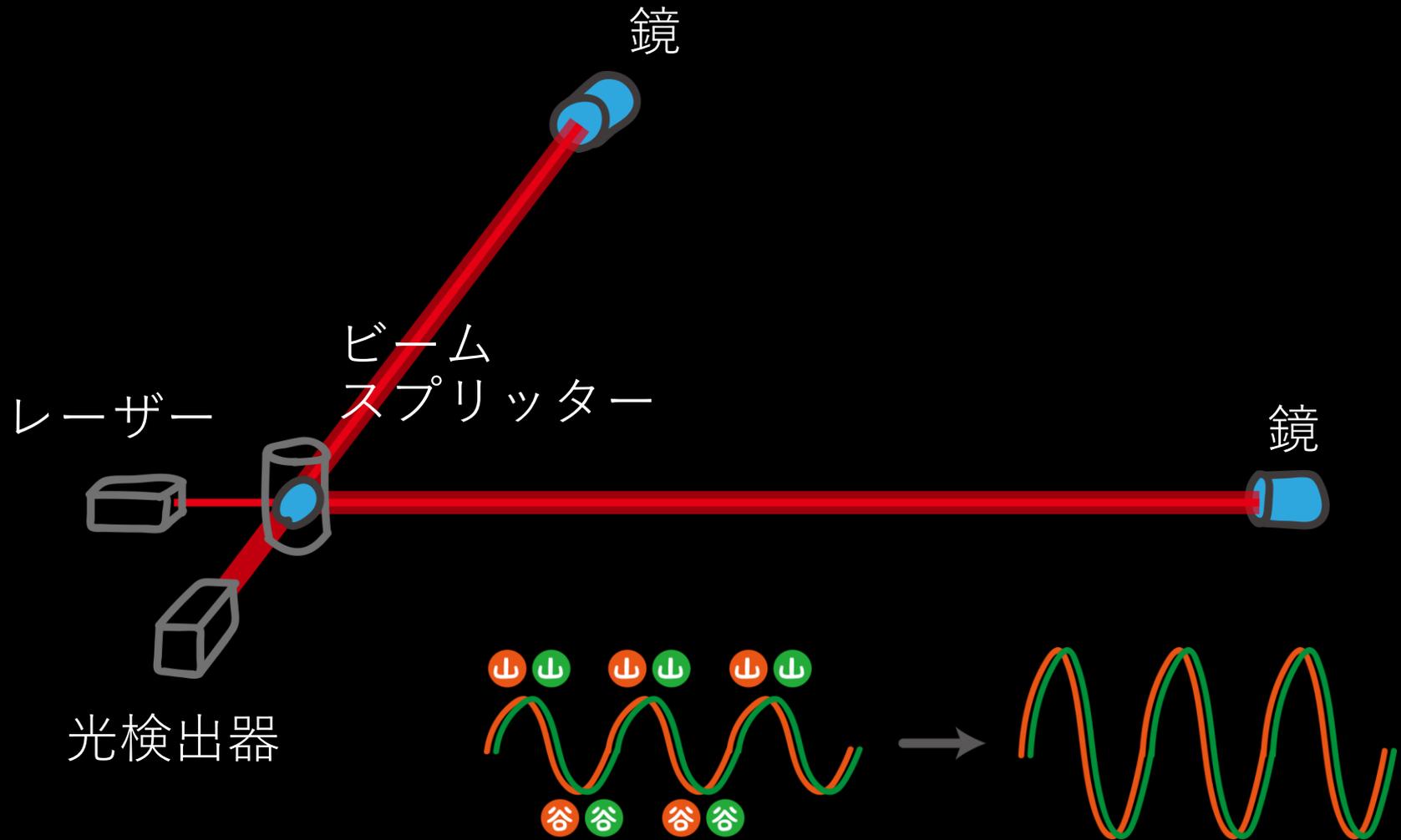
# マイケルソン干渉計



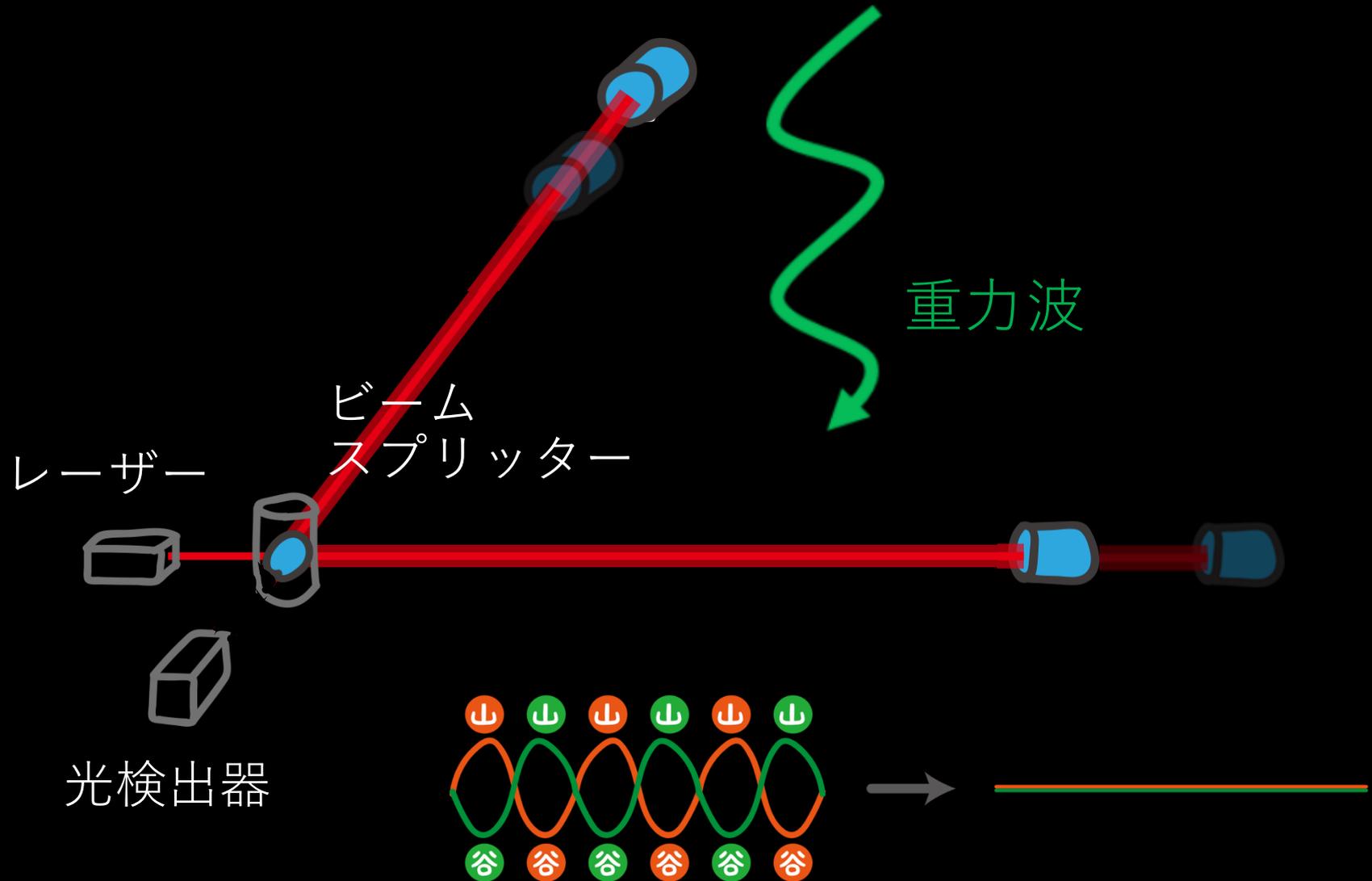
# マイケルソン干渉計



# マイケルソン干渉計

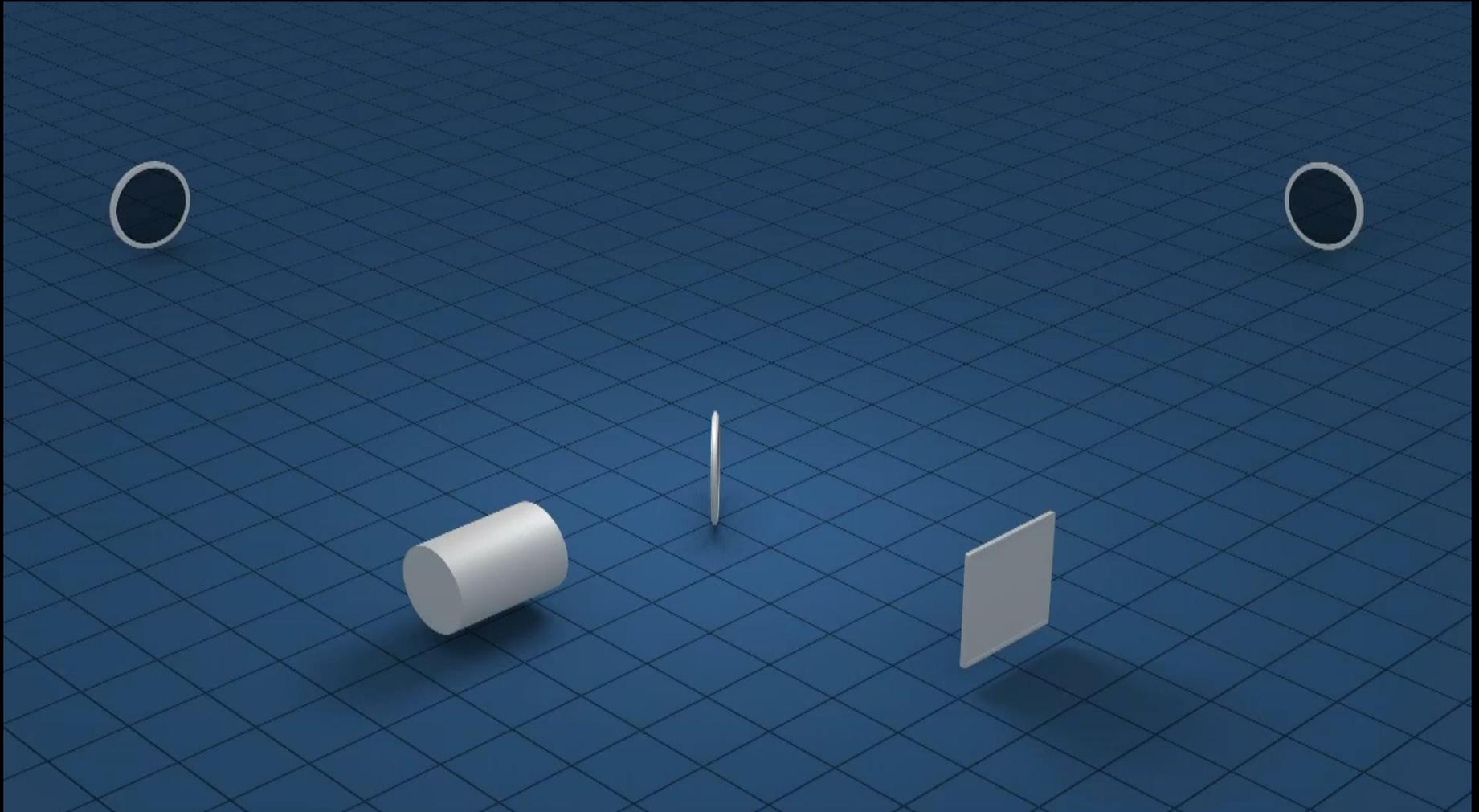


# マイケルソン干渉計

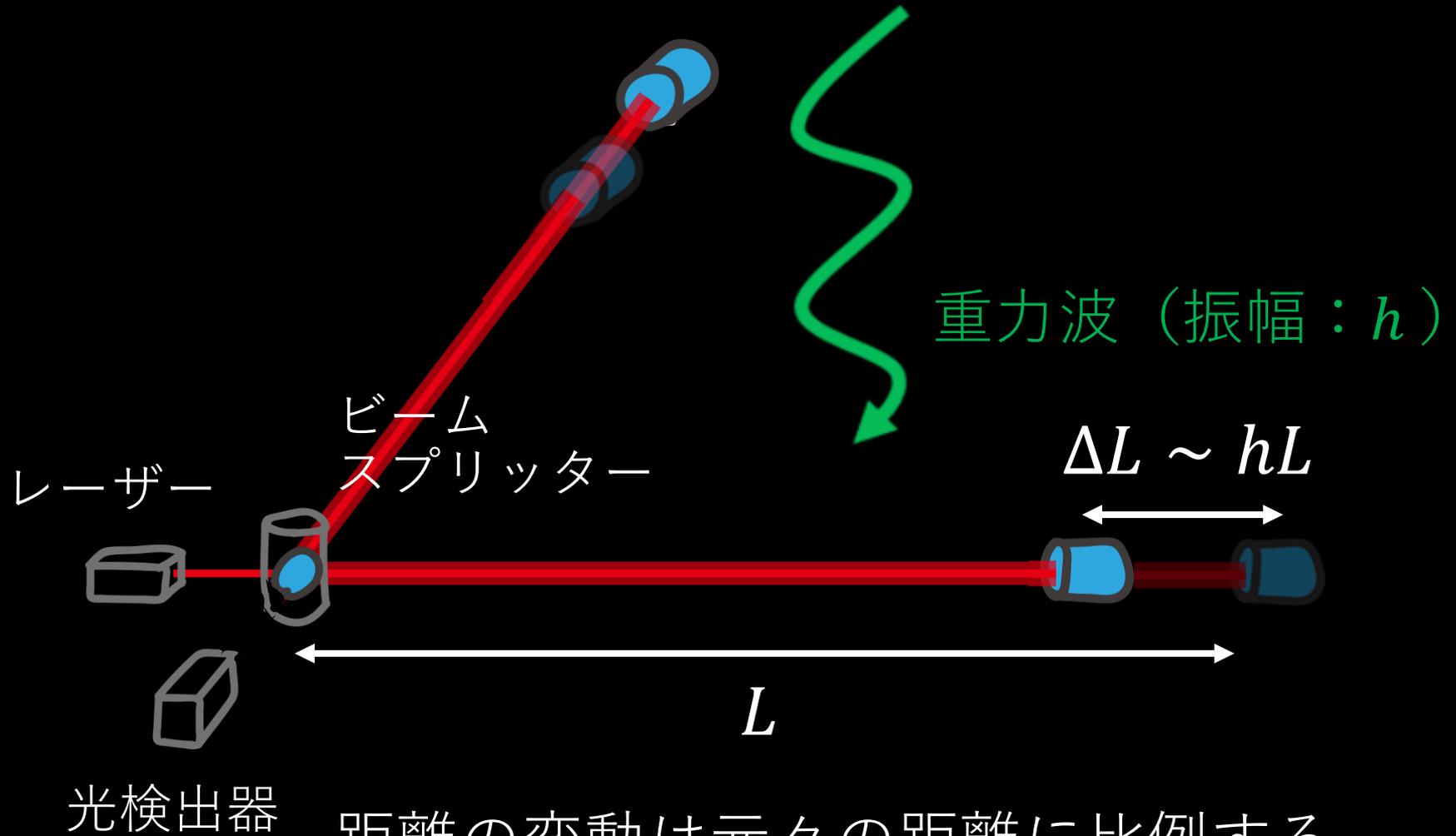


# マイケルソン干渉計

©T. Pyle, Caltech/MIT/LIGO Lab



# マイケルソン干渉計



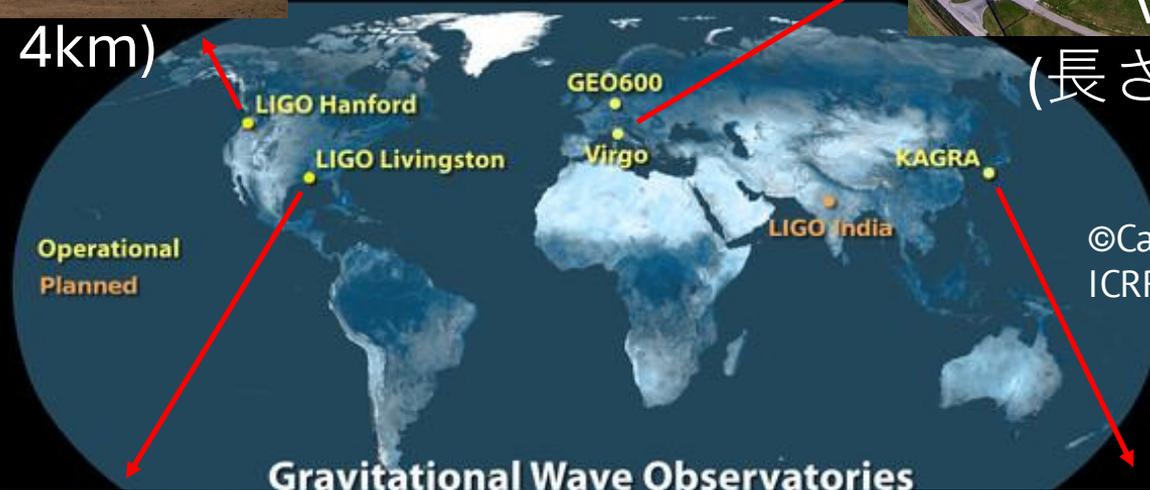
距離の変動は元々の距離に比例する。  
→ 大きい検出器ほど有利！



LIGO Hanford  
(長さ : 4km)



Virgo  
(長さ : 3km)



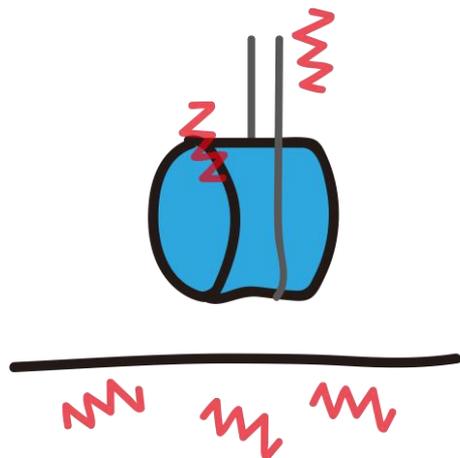
LIGO Livingston  
(長さ : 4km)



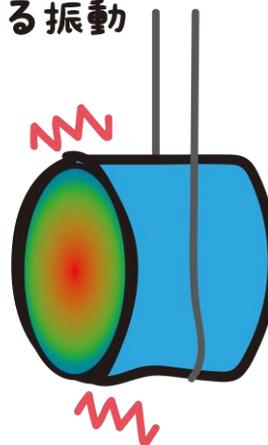
KAGRA  
(長さ : 3km)

# 約二十年にわたる雑音との戦い

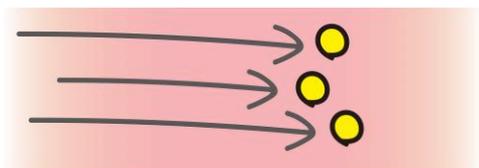
① 地面の振動



② 鏡や振り子の熱による振動

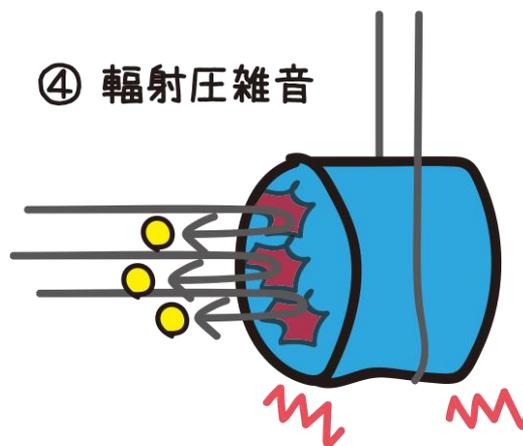


③ ショットノイズ



レーザーの光子の  
バラつきによって生じる

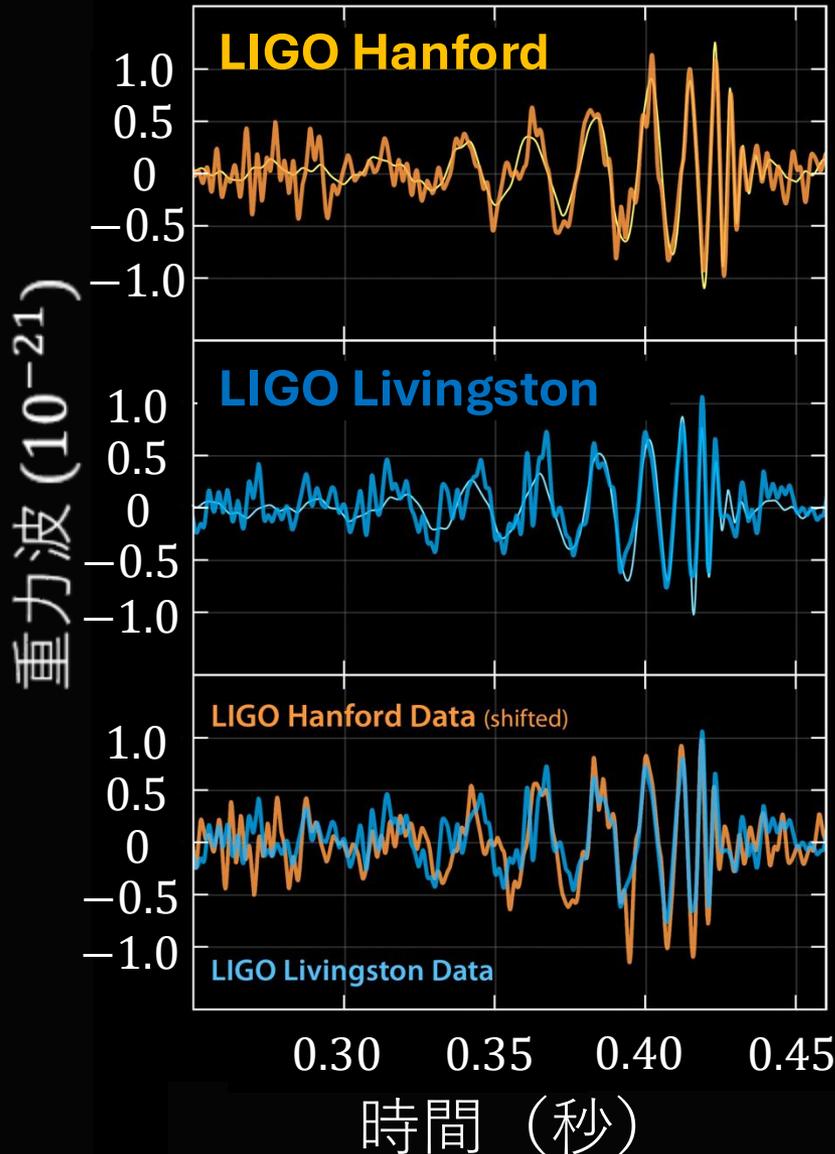
④ 輻射圧雑音



レーザーの光子が  
衝突して鏡が揺れる

# 重力波初検出！

©LIGO Lab



2015年9月14日に観測  
→ **GW150914**と命名

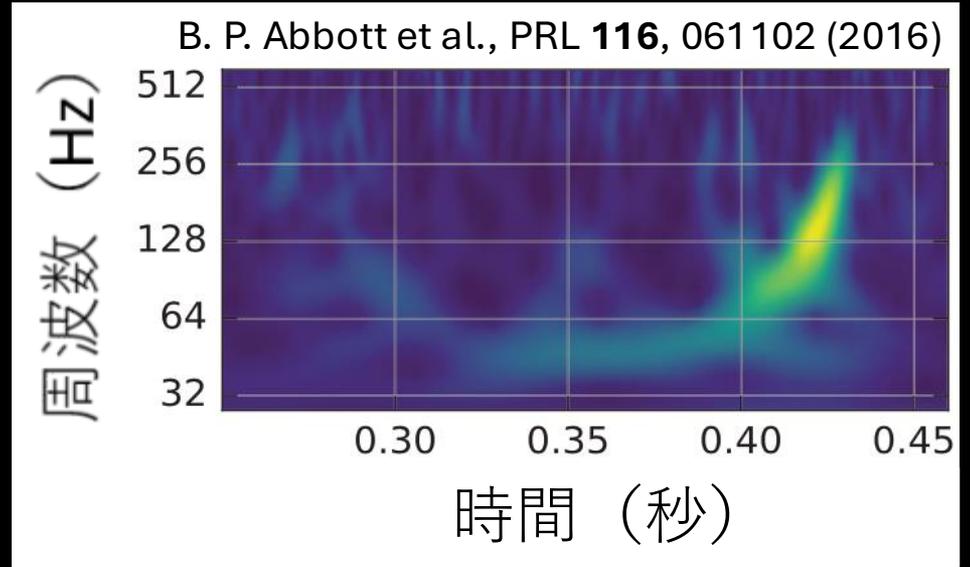
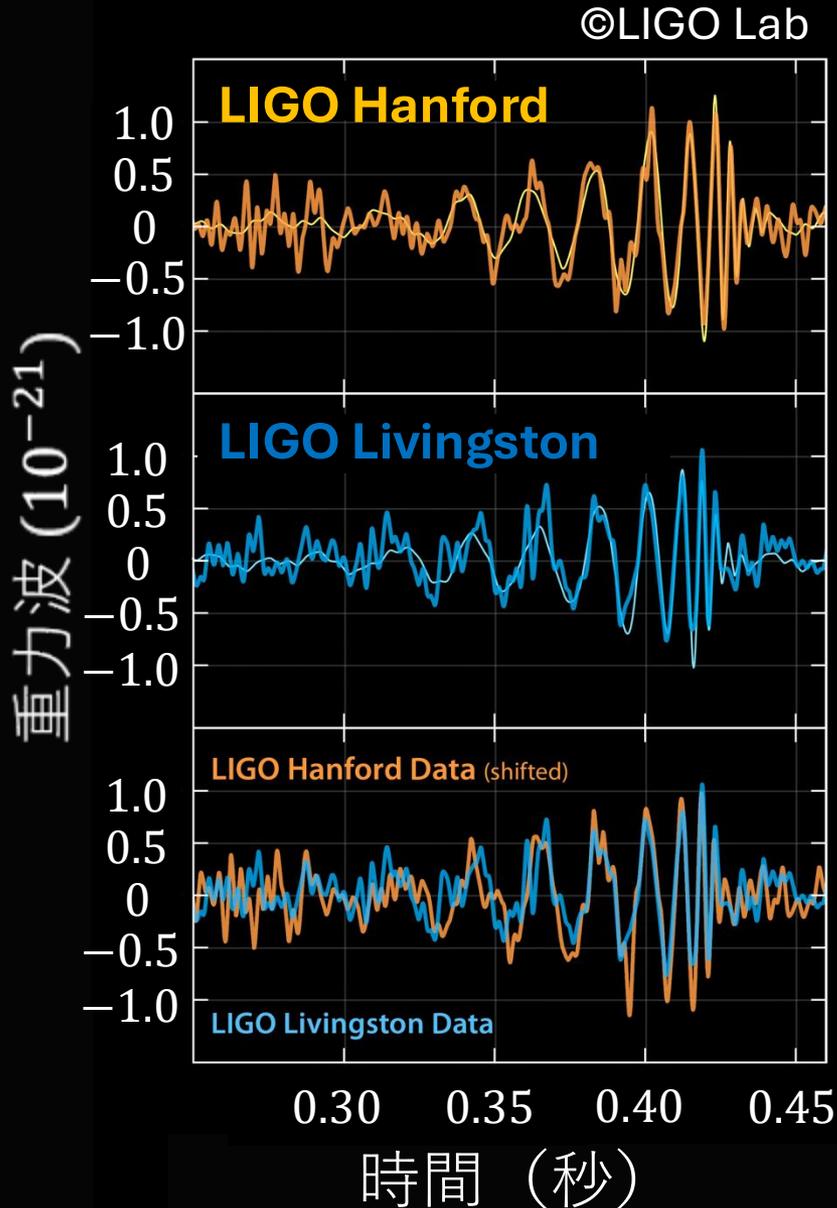
$\Delta L \sim 10^{-21} \times 4 \text{ km}$

$\sim 10^{-18} \text{ m}$

(原子核の大きさが $10^{-15} \text{ m}$   
くらい)

LIGOの第一次長期観測の  
試運転中に見つかった。  
Virgo, KAGRAはまだ観測を  
始めていなかった。

# 重力波初検出！

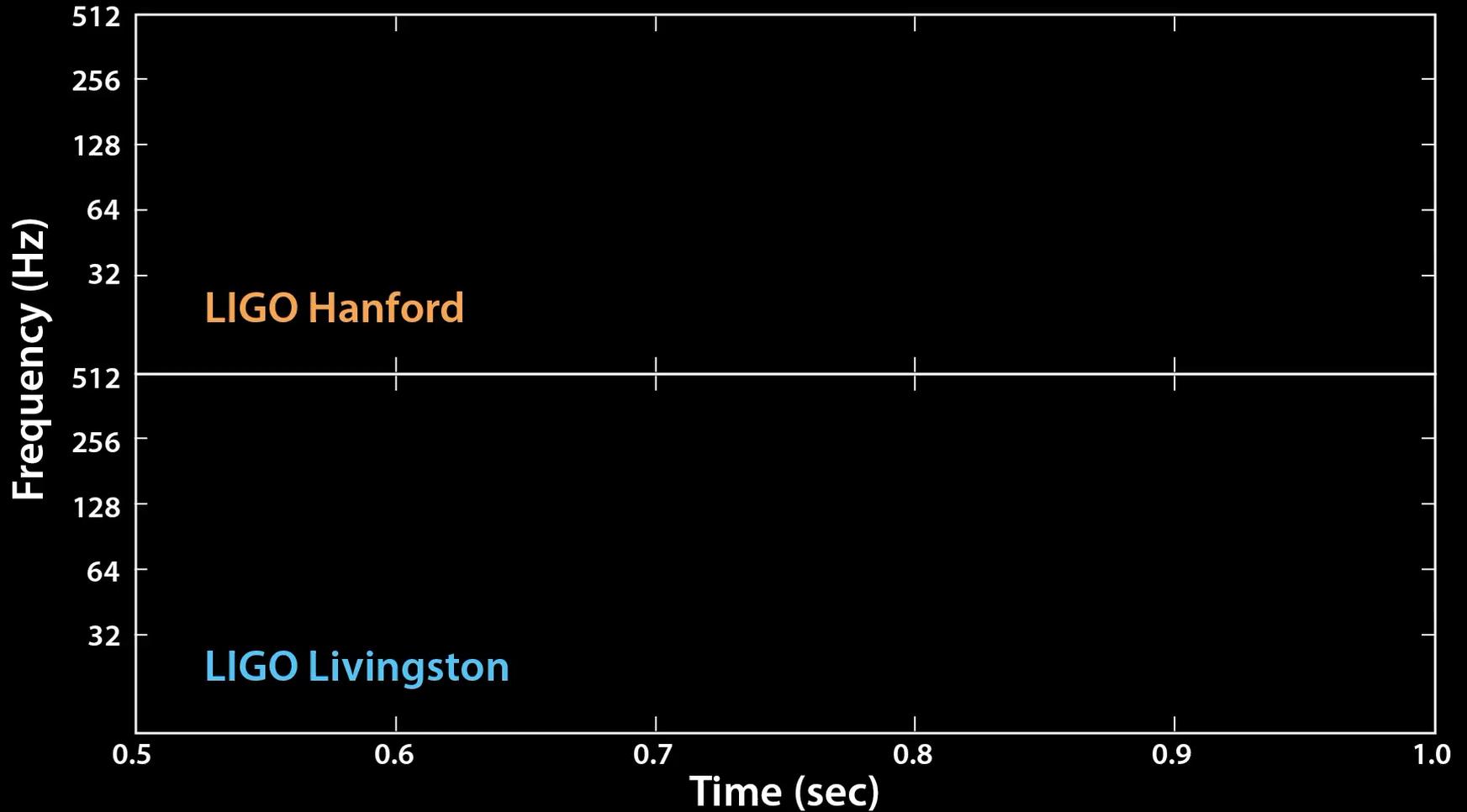


周波数が時間と共に増加

ちょうど人間の可聴域  
(20–20,000 Hz) に入る！

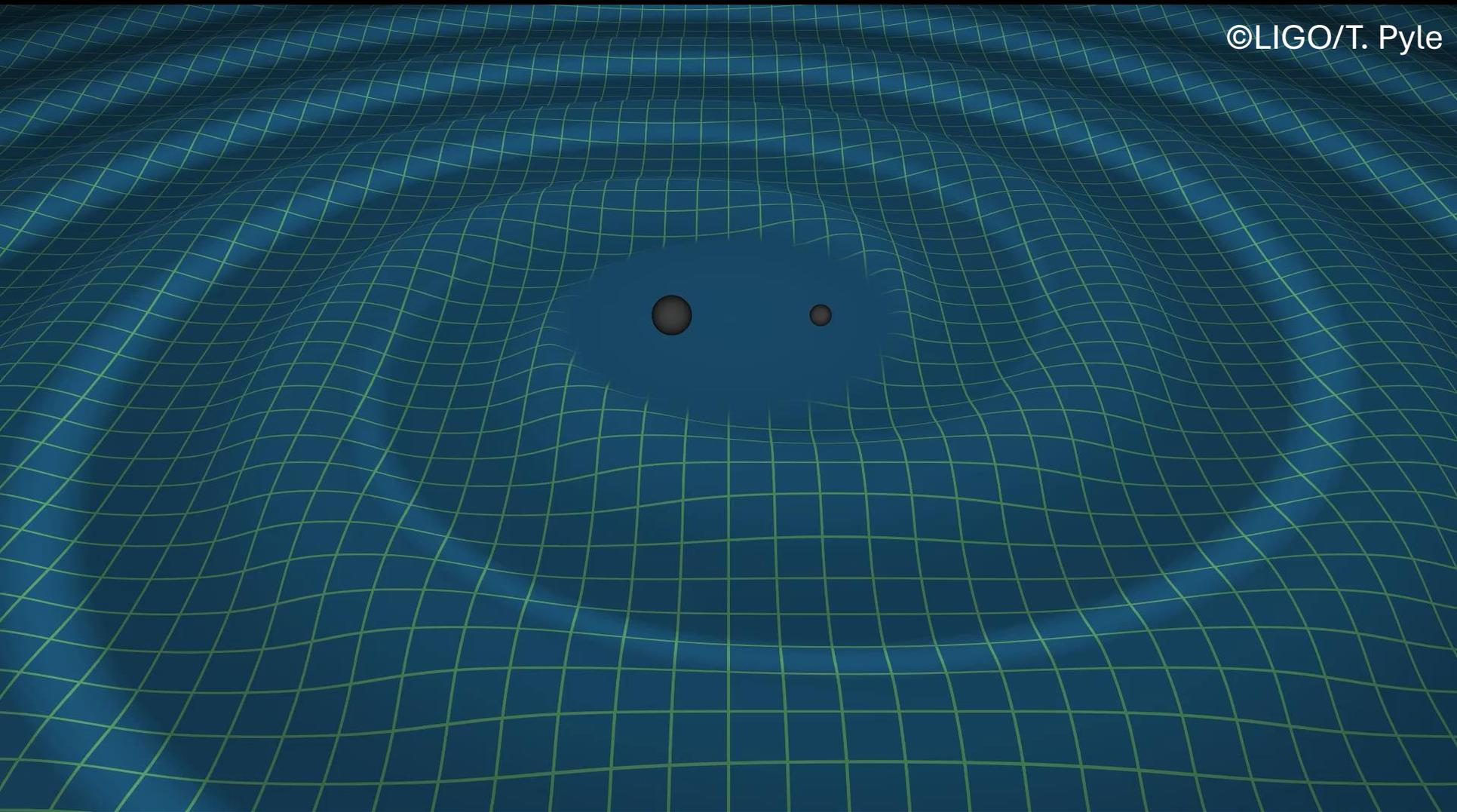
# 重力波初検出！

©Caltech/MIT/LIGO Lab



# GW150914の起源は連星合体

©LIGO/T. Pyle



太陽質量の $36^{+5}_{-4}$ 倍の  
ブラックホール

太陽質量の $29^{+4}_{-4}$ 倍の  
ブラックホール

地球から約**13億**光年

# ブラックホールとは

©NS in my city

- 超コンパクトな天体！  
30倍太陽質量でも半径90km  
(質量は地球の1000万倍)



- 重力が強すぎて光さえも  
抜け出せない。

柏の葉キャンパス駅の真上にある  
30倍太陽質量ブラックホール

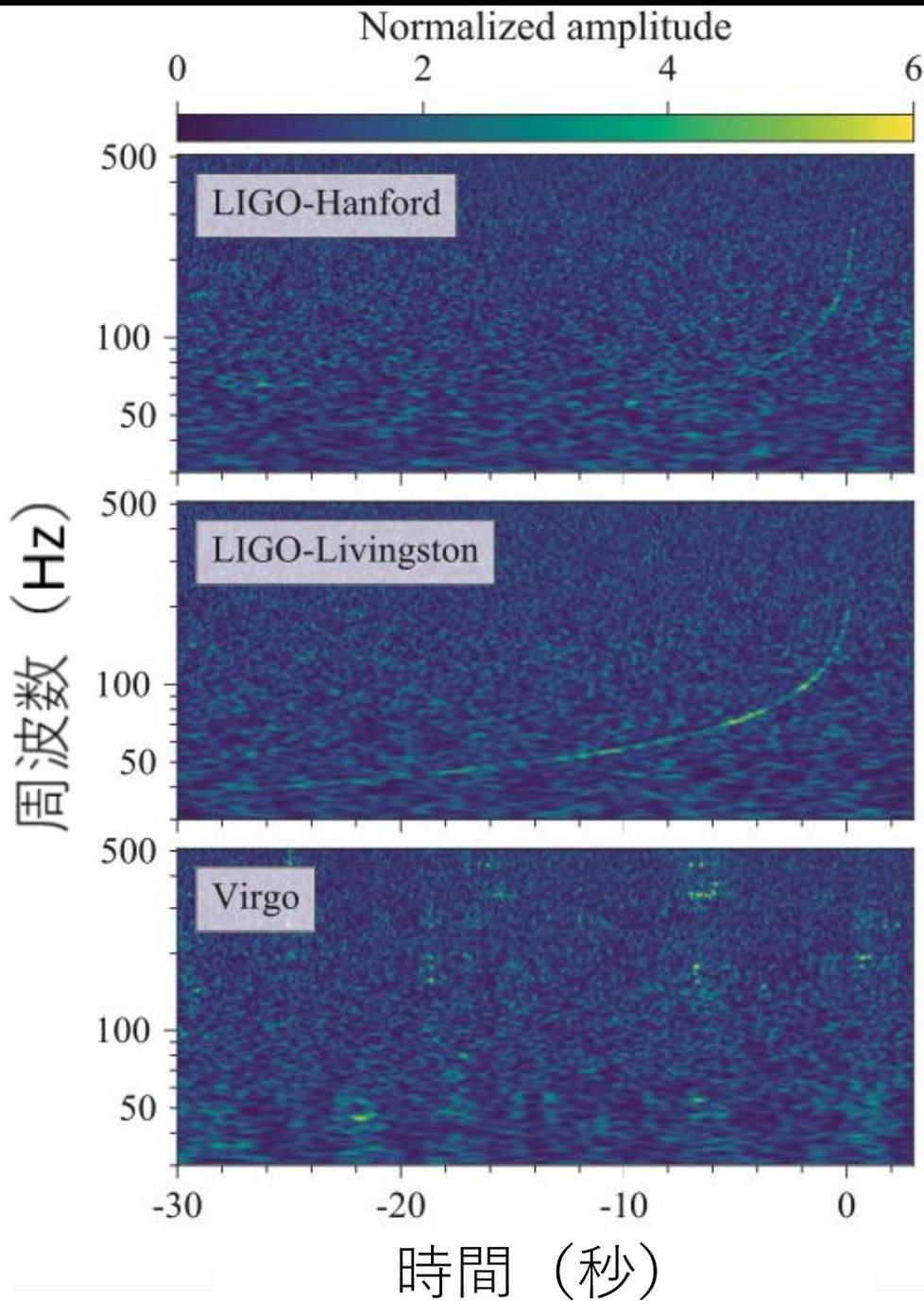
- X線観測などで見つかったブラックホールは  
10倍太陽質量くらい。  
30倍太陽質量のブラックホール検出はこれが初！

# 当時の心境とその後

- 発表当時は駆け出し（修士1年）。重力波を検出するための雑音除去手法の開発を行っていた。  
→これからは**実データの解析**をやりたい！
- 2016年1月に第一次観測は終了。
- 2016年11月から**第二次観測**が開始された。  
ヨーロッパの**Virgo検出器**も観測に加わった。
- 博士課程（2017年4月-）からはLIGOに所属、  
データ解析に貢献。

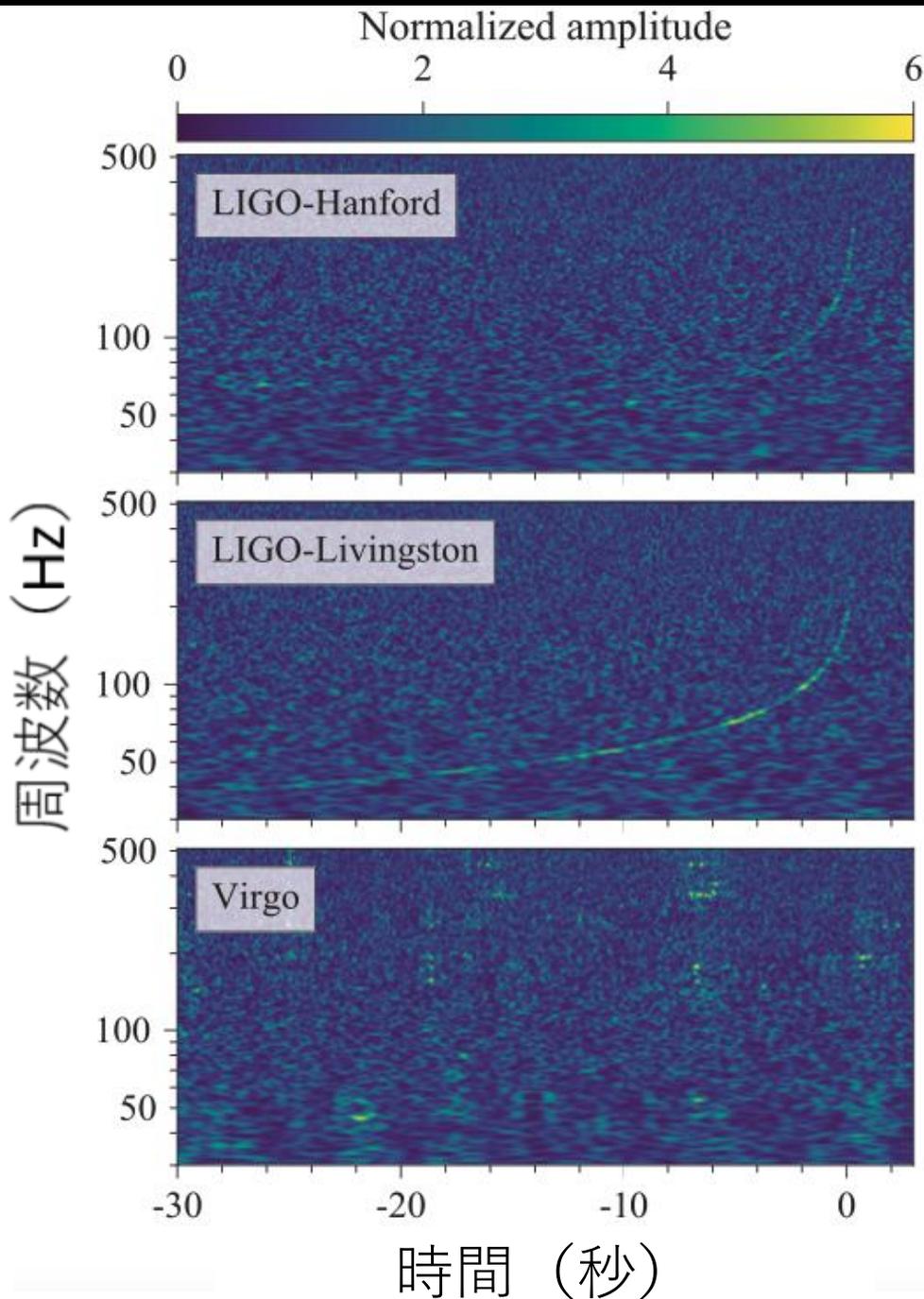
# 2017年8月

- 第二次観測終了直前の2週間の解析シフトに参加した。
- 夜中のミーティング、慣れない英語の議論
- 2週目の中盤までで2つのイベントを検出。  
なかなかラッキーだなと思っていた...



2017年8月17日  
21時41分 (日本時間)

Credit: B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017).



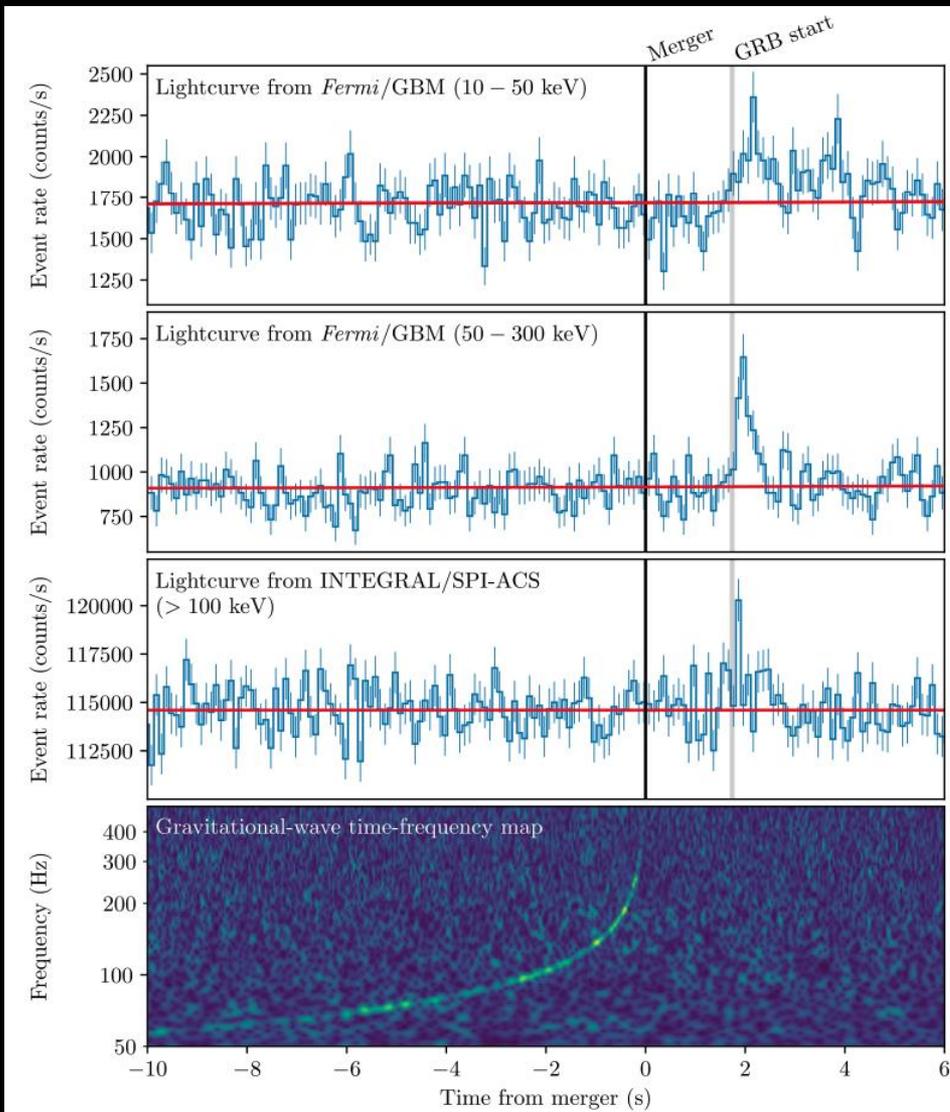
2017年8月17日  
21時41分 (日本時間)

**GW170817**と命名

1.4倍太陽質量くらいの  
星の合体

Credit: B. P. Abbott et al., Phys. Rev.  
Lett. **119**, 161101 (2017).

# ほぼ同時にガンマ線が検出！



重力波の1.7秒後に  
ガンマ線バーストが  
*Fermi*衛星により  
検出！



Credit: LIGO, Virgo, Fermi GBM, and Integral (2017).

Credit: NASA  
41

# 中性子星

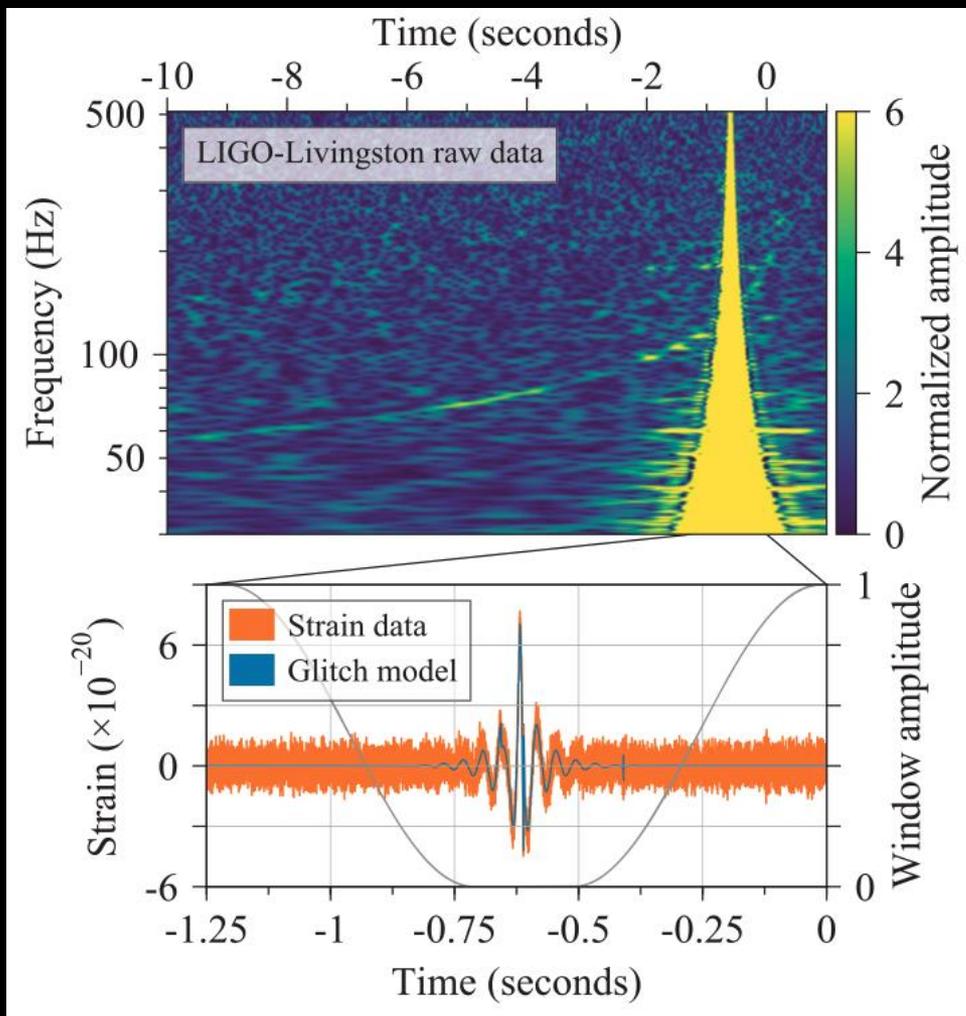
- 質量：典型的には太陽の1.4倍
- 半径：約10km

➡ 小さじ一杯（5mL）で10億トン！

©国立天文台



# 大変なことになった！

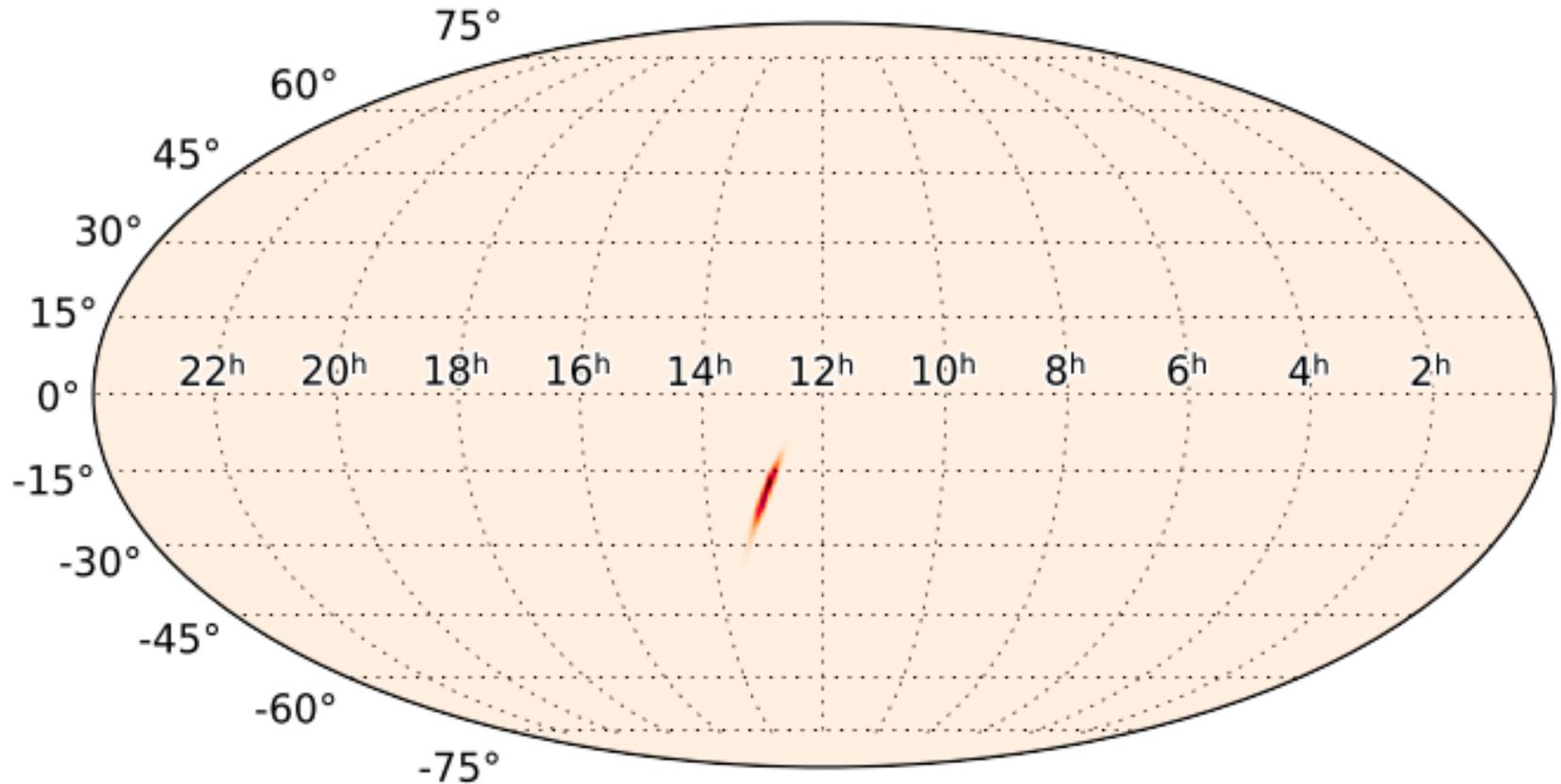


**重力波源の位置**をできるだけ早く追観測グループに伝えなければ。

Livingstonのデータに**突発的雑音**が！  
慎重な解析が必要だった。

Credit: B. P. Abbott et al., PRL **119**, 161101 (2017).

約5時間後（翌日の午前3時頃）に位置を報告

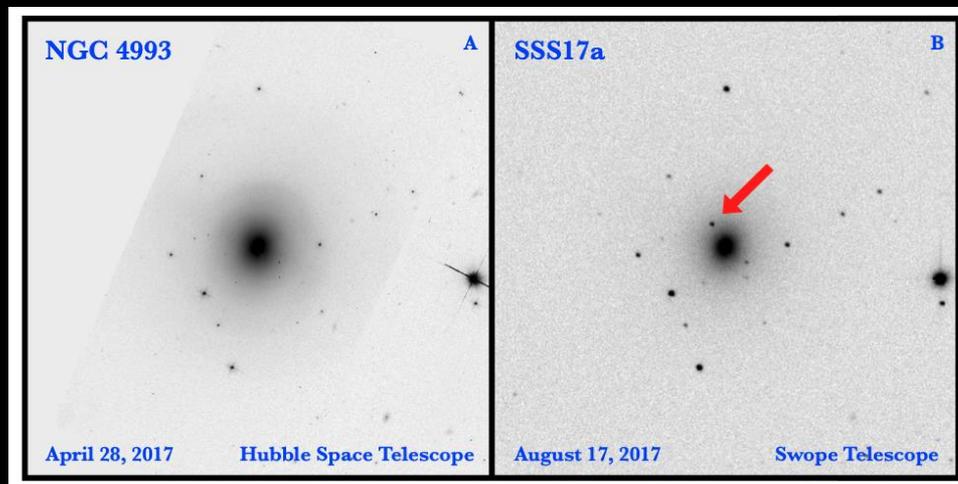


30平方度 = 月150個分！

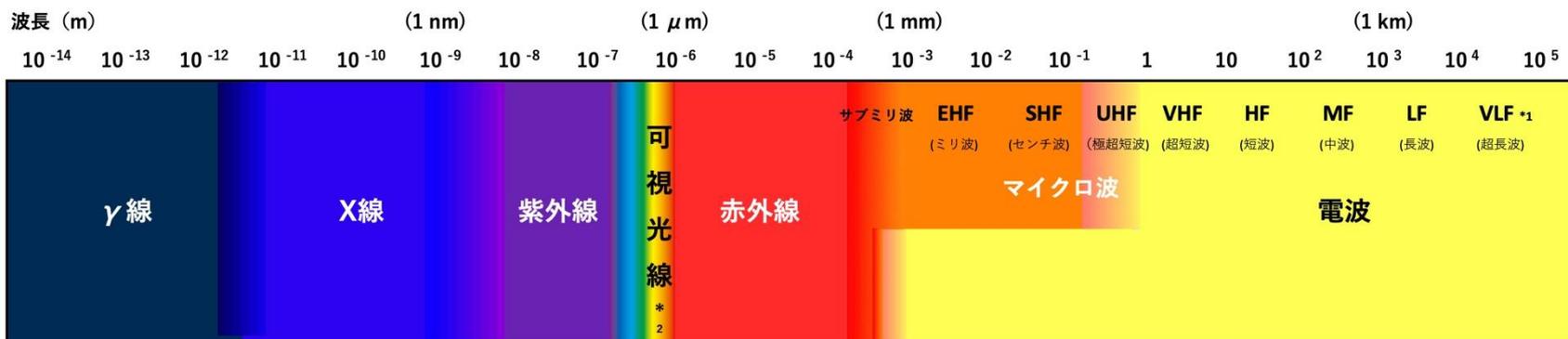
# 対応天体が見つかる！

Credit: D. A. Coulter et al. (2017)

さらに約7時間後、  
チリのSwope望遠鏡で  
対応天体の発見が報告



## X線から電波の幅広い波長帯で観測に成功。



\*1 電波の周波数帯の英字による呼び方は国際電気通信条約無線規則による。

\*2 JIS Z 8120 (用語の定義)による。



## Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube Collaboration, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN Collaboration, The Insight-Hxmt Collaboration, ANTARES Collaboration, The Swift Collaboration, AGILE Team, The 1M2H Team, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, GRAWITA: GRAvitational Wave Inaf TeAm, The Fermi Large Area Telescope Collaboration, ATCA: Australia Telescope Compact Array, ASKAP: Australian SKA Pathfinder, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper, Wider, Faster Program), AST3, and CAASTRO Collaborations, The VINROUGE Collaboration, MASTER Collaboration, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, Caltech-NRAO, TTU-NRAO, and NuSTAR Collaborations, Pan-STARRS, The MAXI Team, TZAC Consortium, KU Collaboration, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS: Transient Robotic Observatory of the South Collaboration, The BOOTES Collaboration, MWA: Murchison Widefield Array, The CALET Collaboration, IKI-GW Follow-up Collaboration, H.E.S.S. Collaboration, LOFAR Collaboration, LWA: Long Wavelength Array, HAWC Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, ALMA Collaboration, Euro VLBI Team, Pi of the Sky Collaboration, The Chandra Team at McGill University, DFN: Desert Fireball Network, ATLAS, High Time Resolution Universe Survey, RIMAS and RATIR, and SKA South Africa/MeerKAT  
(See the end matter for the full list of authors.)

世界中の望遠鏡が観測、著者名だけで10ページ！

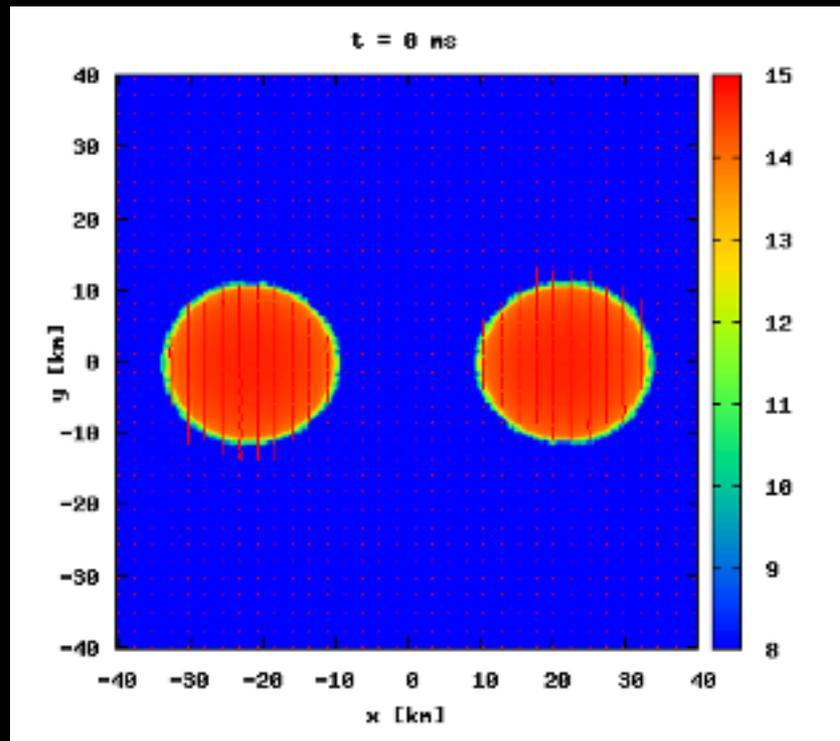
重力波で聞いて電磁波で見る、  
マルチメッセンジャー天文学時代の到来！

# 連星中性子星合体は宝の山！

金 ( $_{79}\text{Au}$ )・プラチナ ( $_{78}\text{Pt}$ )などの**重元素**がどうやって出来たのかは長年の謎であった。

→ **連星中性子星合体**がその候補だった。

合体で放出される物質で**rプロセス**が起きるから。



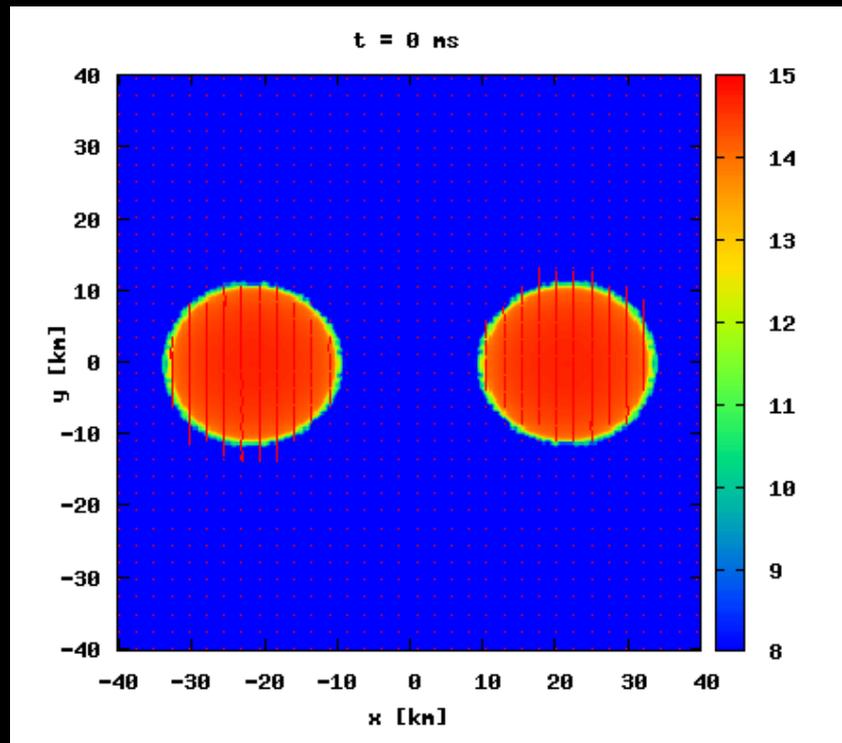
©関口、木内、  
久徳、柴田  
(2011)

# 連星中性子星合体は宝の山！

金 ( $_{79}\text{Au}$ )・プラチナ ( $_{78}\text{Pt}$ )などの**重元素**がどうやって出来たのかは長年の謎であった。

→ **連星中性子星合体**がその候補だった。

合体で放出される物質で**rプロセス**が起きるから。



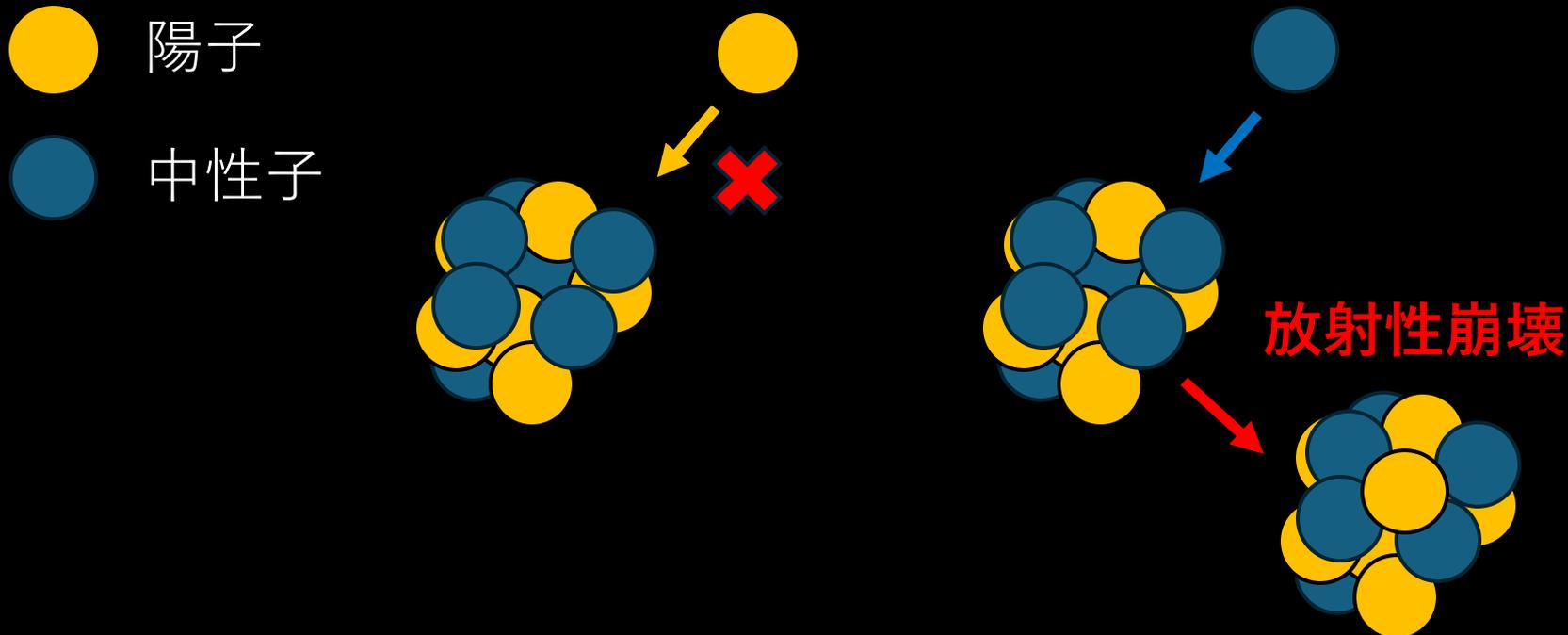
©関口、木内、  
久徳、柴田  
(2011)

# 連星中性子星合体は宝の山！

金 ( $_{79}\text{Au}$ )・プラチナ ( $_{78}\text{Pt}$ )などの**重元素**がどうやって出来たのかは長年の謎であった。

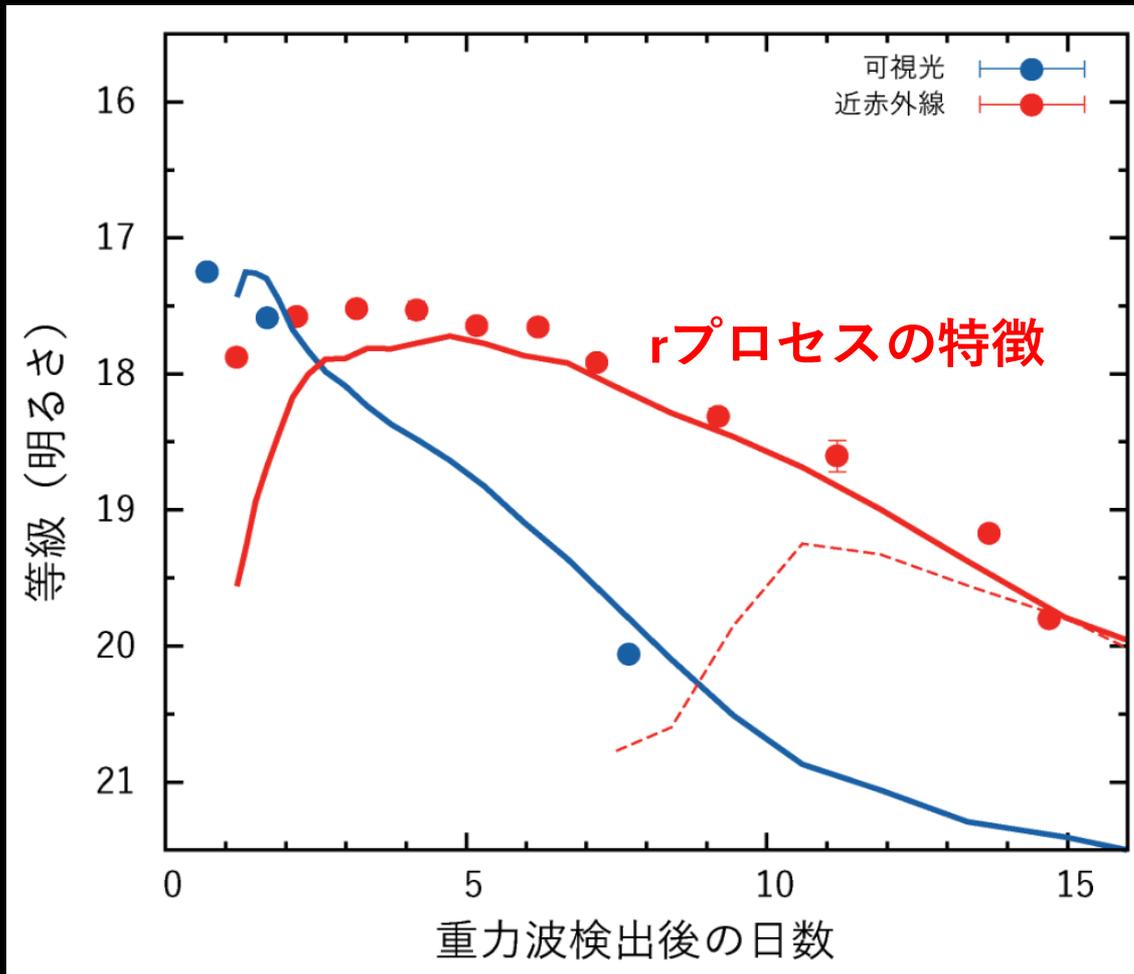
→ **連星中性子星合体**がその候補だった。

合体で放出される物質で**rプロセス**が起きるから。



# 連星中性子星合体は宝の山！

©Tanaka, Utsumi et al. 2017, 国立天文台



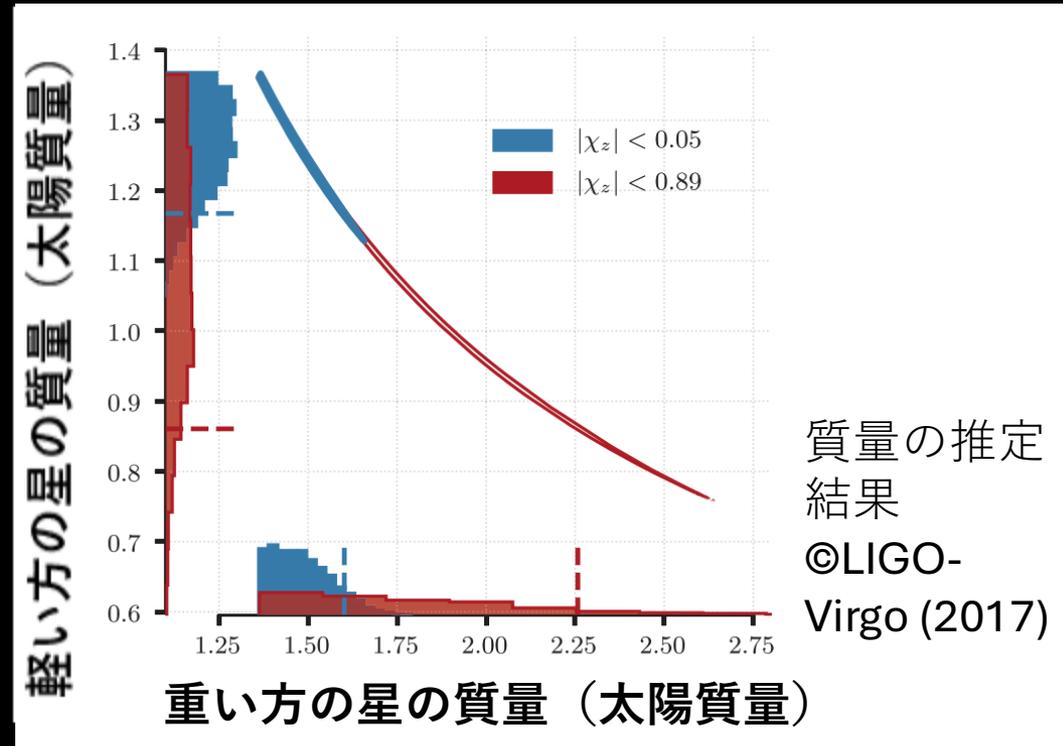
放射性崩壊の  
エネルギーで  
赤外線で光る！  
= キロノバ

確かにrプロセスが  
起きている！  
= 重元素が生成  
されている！

# 私の貢献とその後の研究

- 質量・距離などの  
詳細な推定

**1.36倍太陽質量**  
→ の星同士の衝突  
と無矛盾



- 連星中性子星合体信号の解析の高速化  
(博士課程 - 研究員@ミルウォーキー)

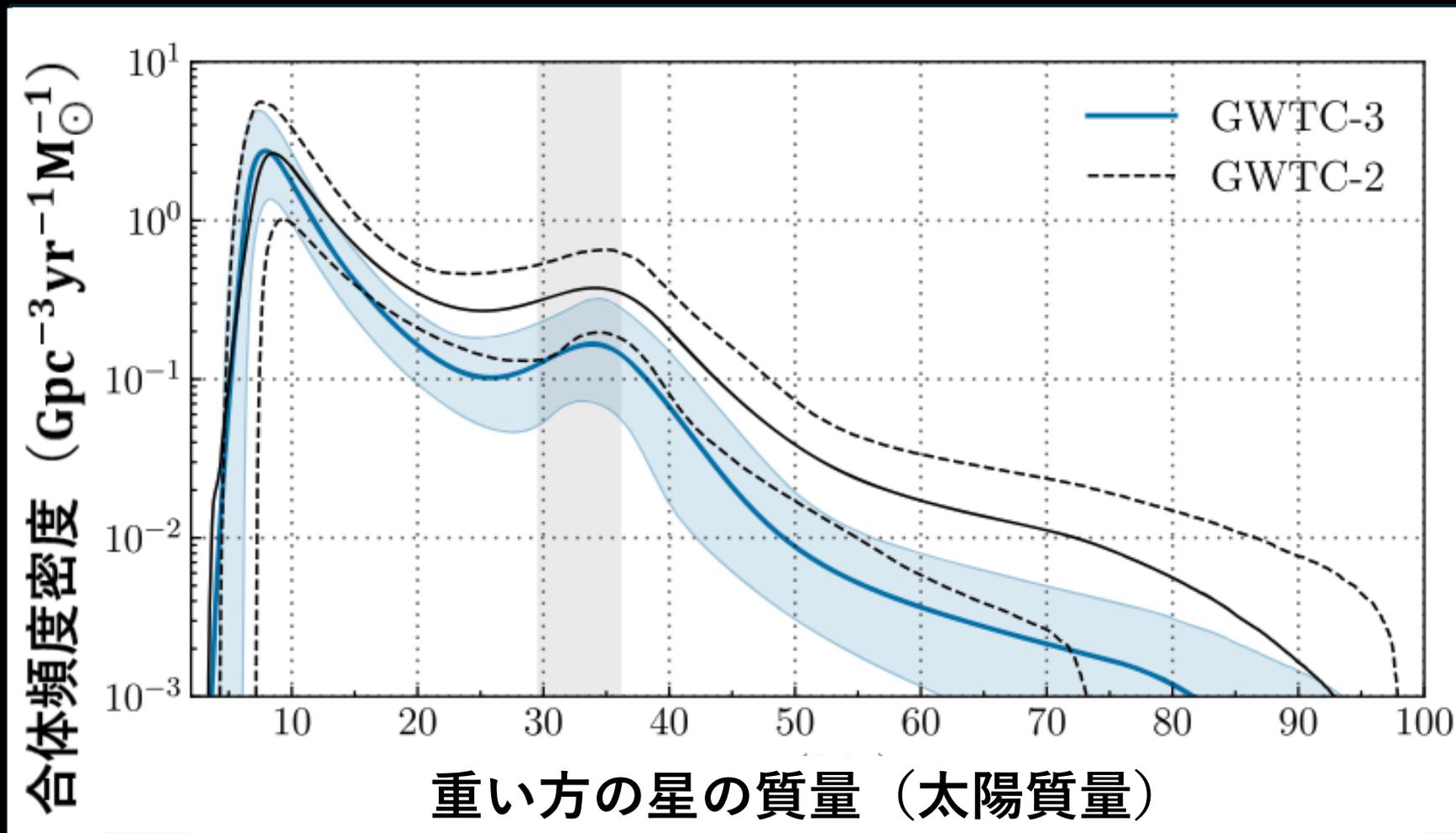
→ 1ヶ月以上かかる解析を**2時間以内**に！現在の  
LIGO-Virgo-KAGRAの解析に用いられている。

そして時は流れ...

- **第三次観測（2019年4月–2020年3月）**
- **第四次観測（2023年5月–）**
- **合計で約300イベントの検出が報告**
- **数日（2–3日）に1回の頻度で重力波が検出**

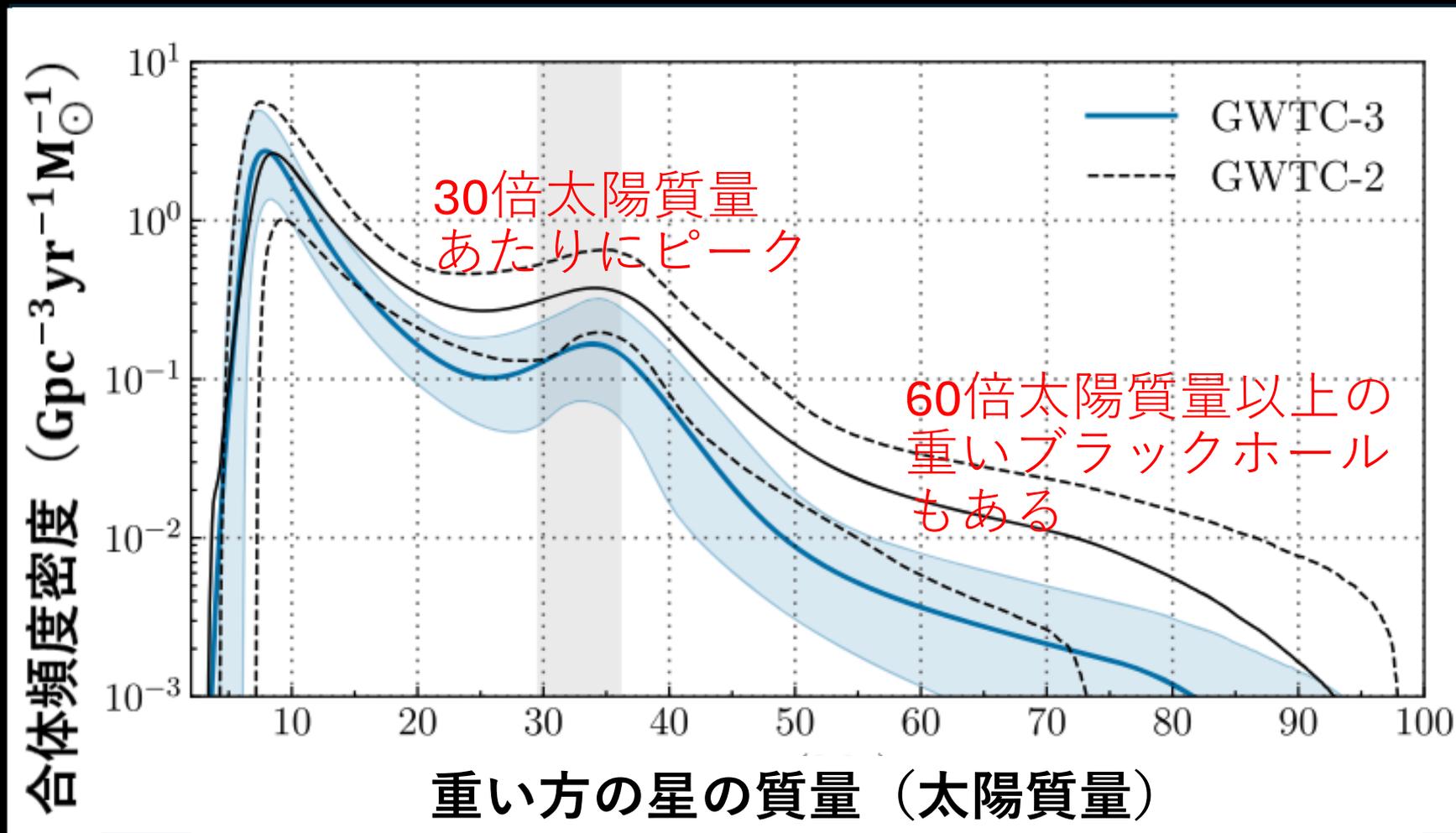
# 連星ブラックホールの起源は？

©LIGO-Virgo-KAGRA (2023)



# 連星ブラックホールの起源は？

©LIGO-Virgo-KAGRA (2023)



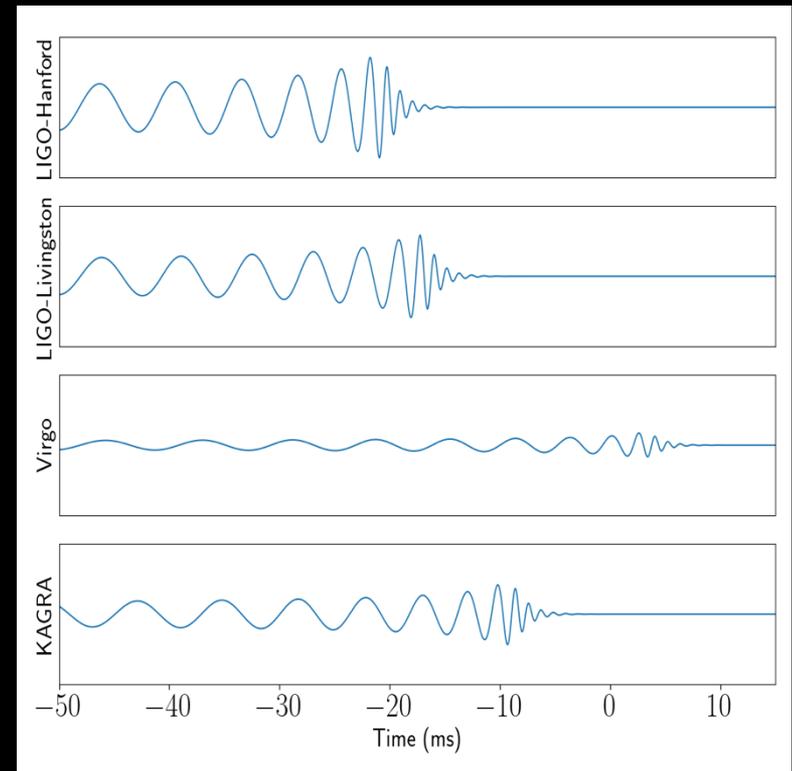
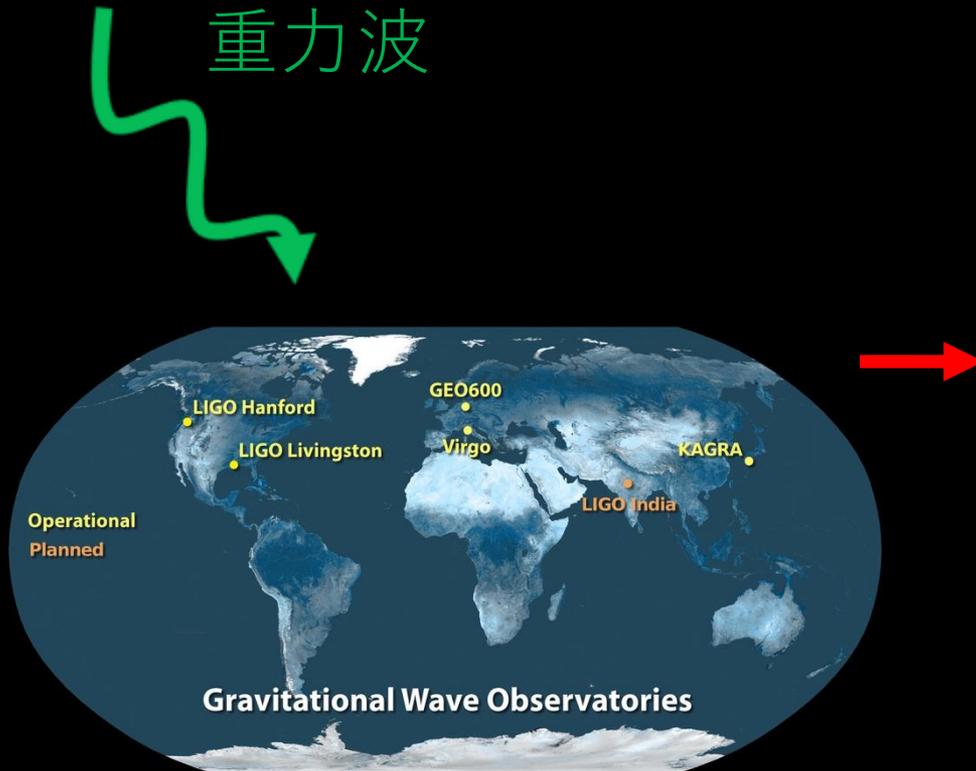
# KAGRAが2020年2月に観測を開始！



# なぜKAGRAが必要？

波源の位置は検出器間の時間差・振幅比から分かる。

→ 検出器が多いほど**位置決定精度**が向上する！



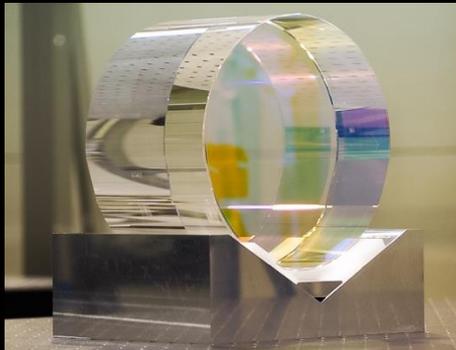
# KAGRAの強みは？

地下200 m

→ 地面振動を削減

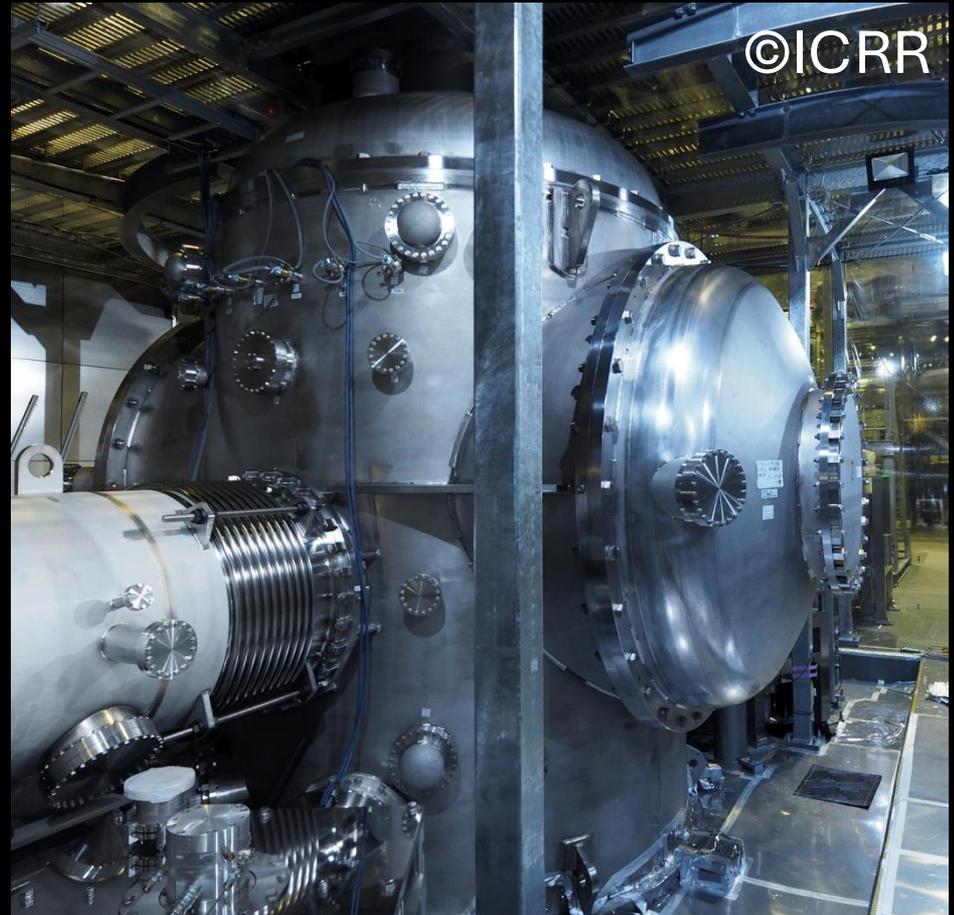
→  $-253^{\circ}\text{C}$ に鏡を冷やす

→ 熱雑音を削減



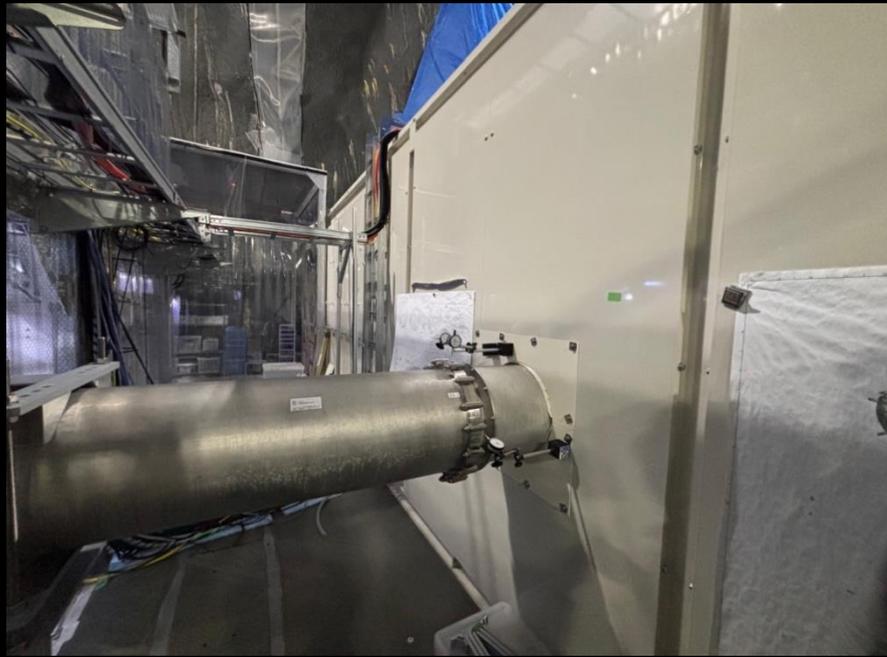
サファイア鏡

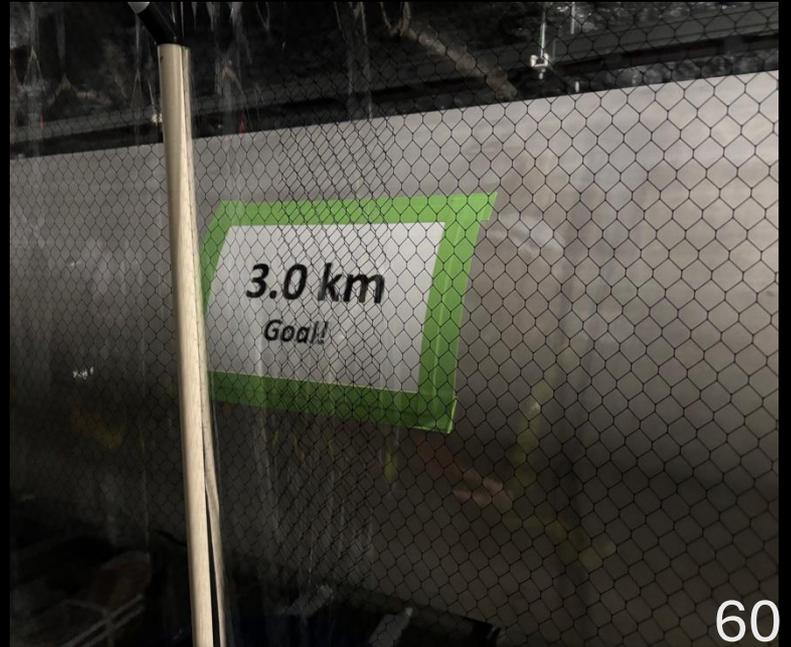
(<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/archives/2696>より)



サファイア鏡を冷やす  
低温真空機

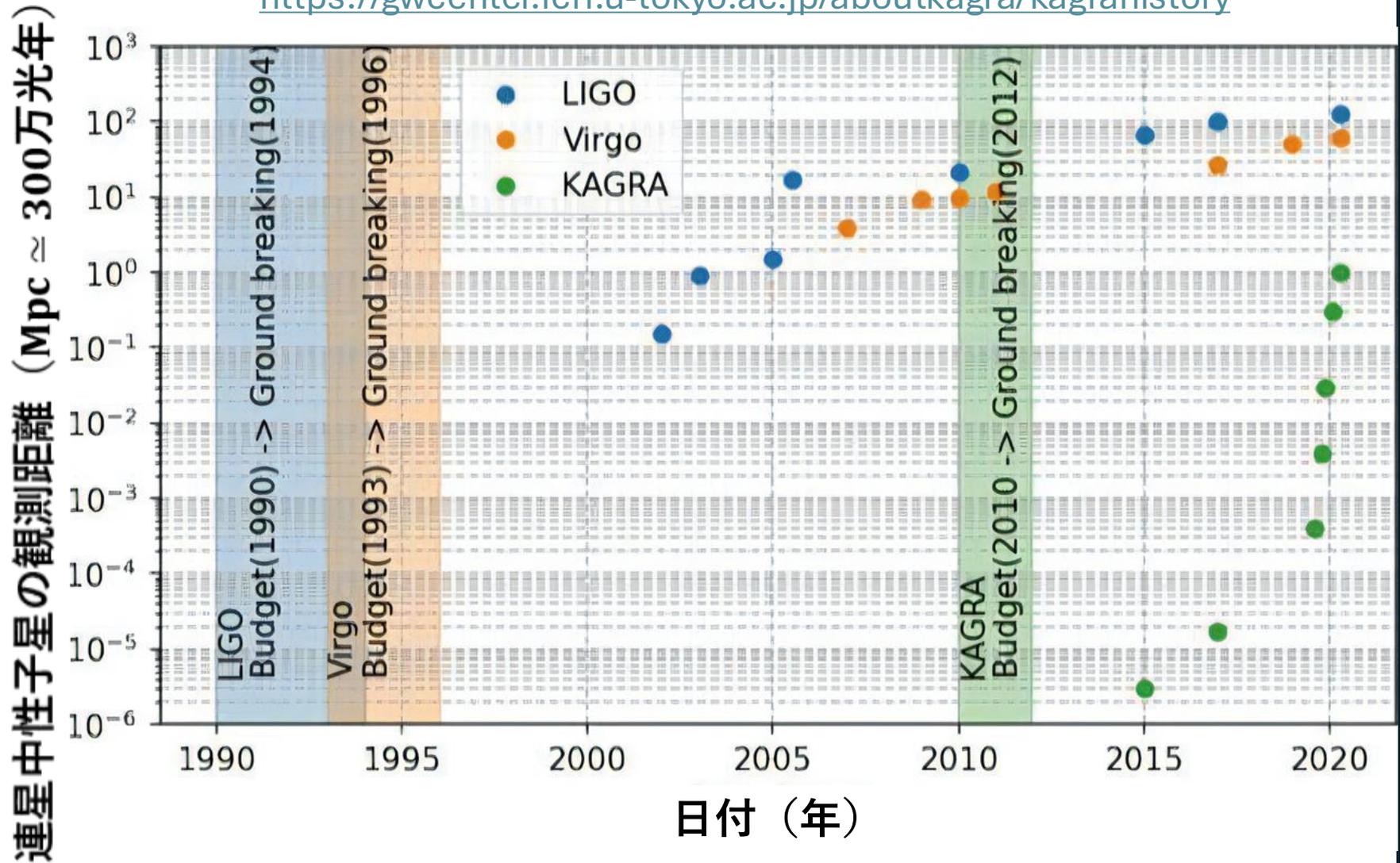






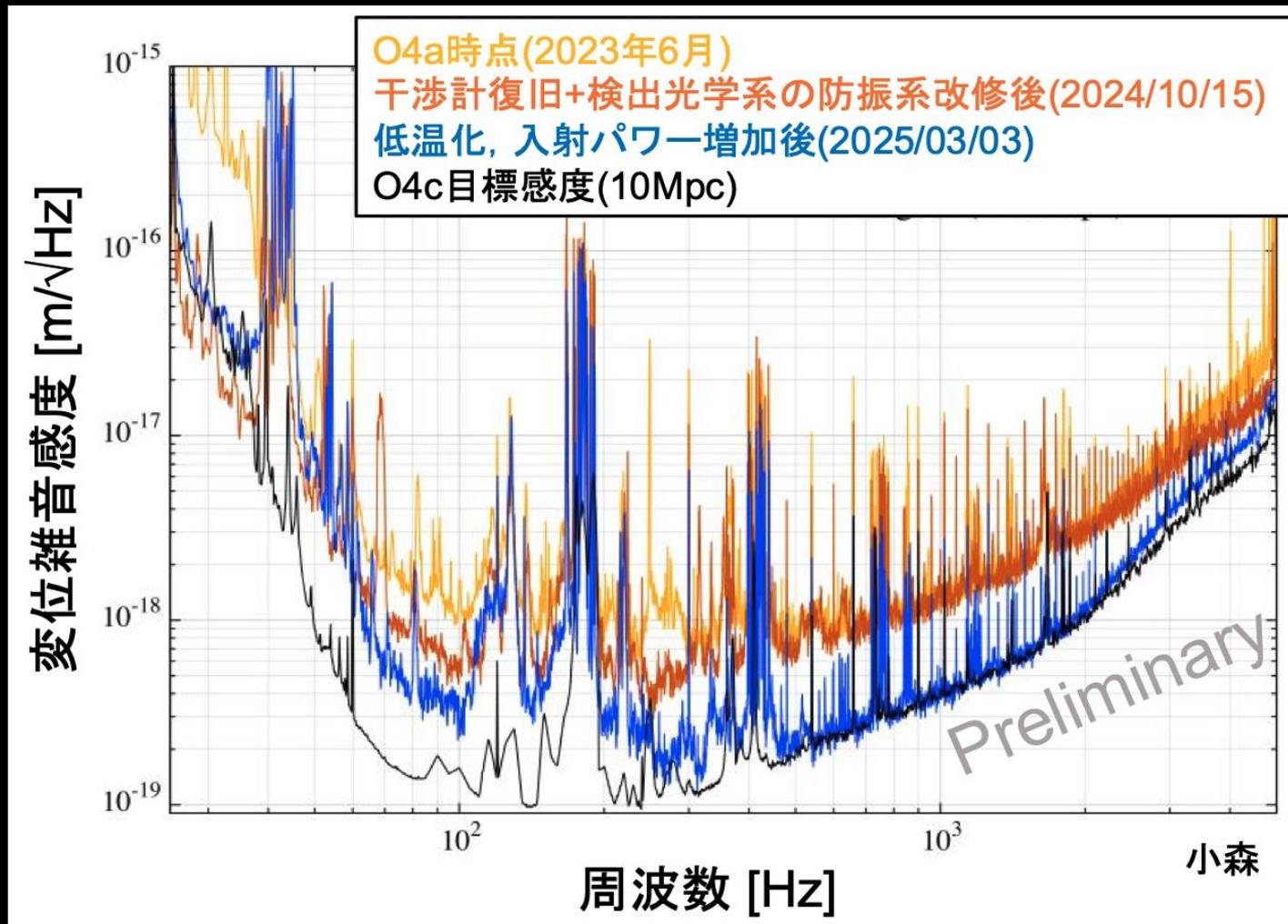
# KAGRAの現状と今後

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/aboutkagra/kagrahistory>



# KAGRAの現状と今後

10Mpc=3000万光年の感度で6月から観測再開予定



# まとめ

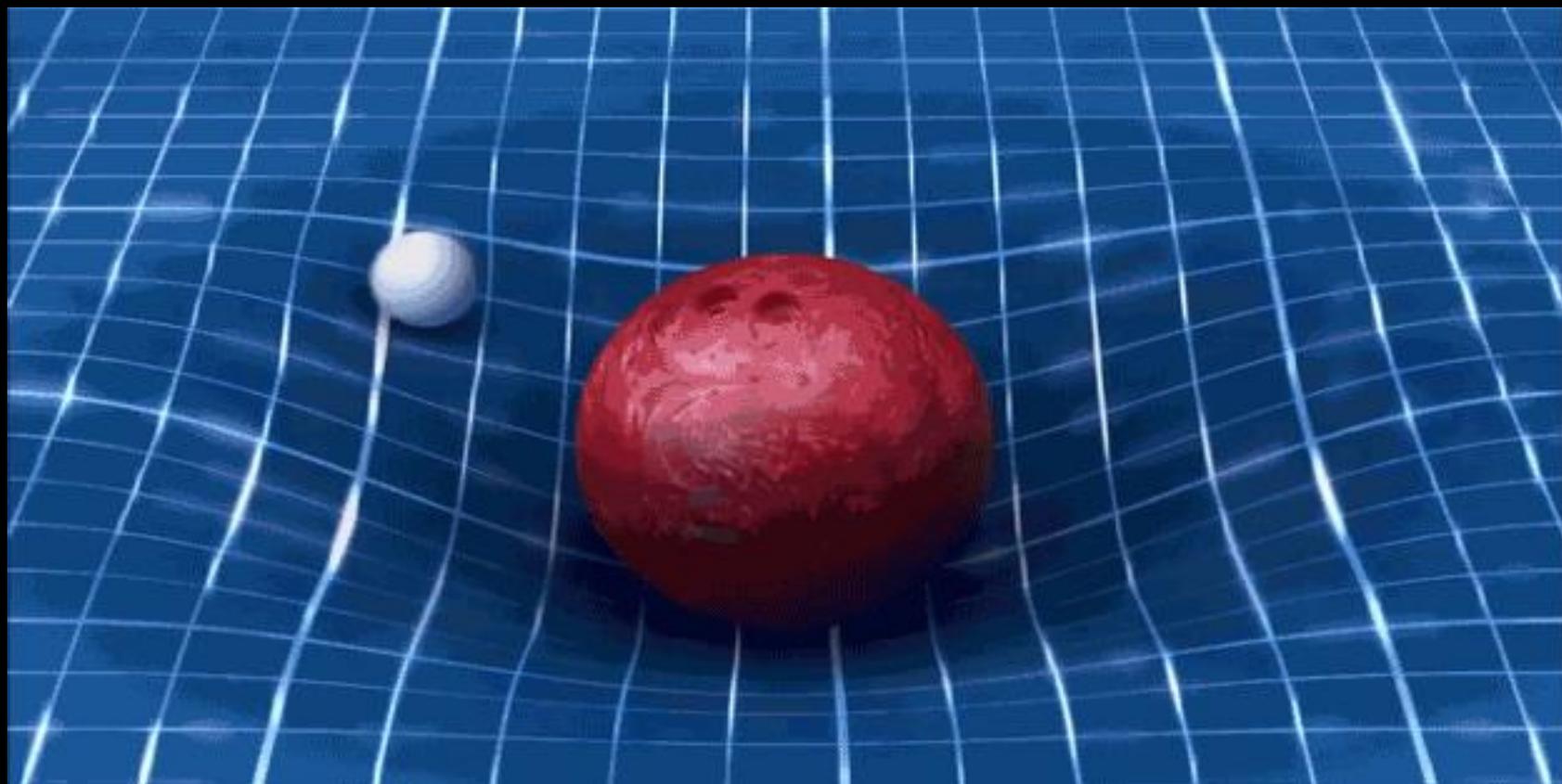
- 重力波が検出され、様々なことがわかった。
  - **30倍太陽質量のブラックホール**が存在する。
  - **連星中性子星合体**からの重力波が検出され、付随する電磁波放射も観測された。**重元素**が生成されることも確かめられた。
  - 現在では**数日に1回**の頻度で検出。重力波源の統計的性質を調べることが可能となった。
- 今後は**日本のKAGRA**が重要な貢献をする。
  - **重力波源の位置**をより精度良く決め、電磁波との同時観測の成功率を高める。
  - 世界で始めて**地下・低温鏡**の干渉計で重力波を検出する。

# アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

↑  
時空の歪み

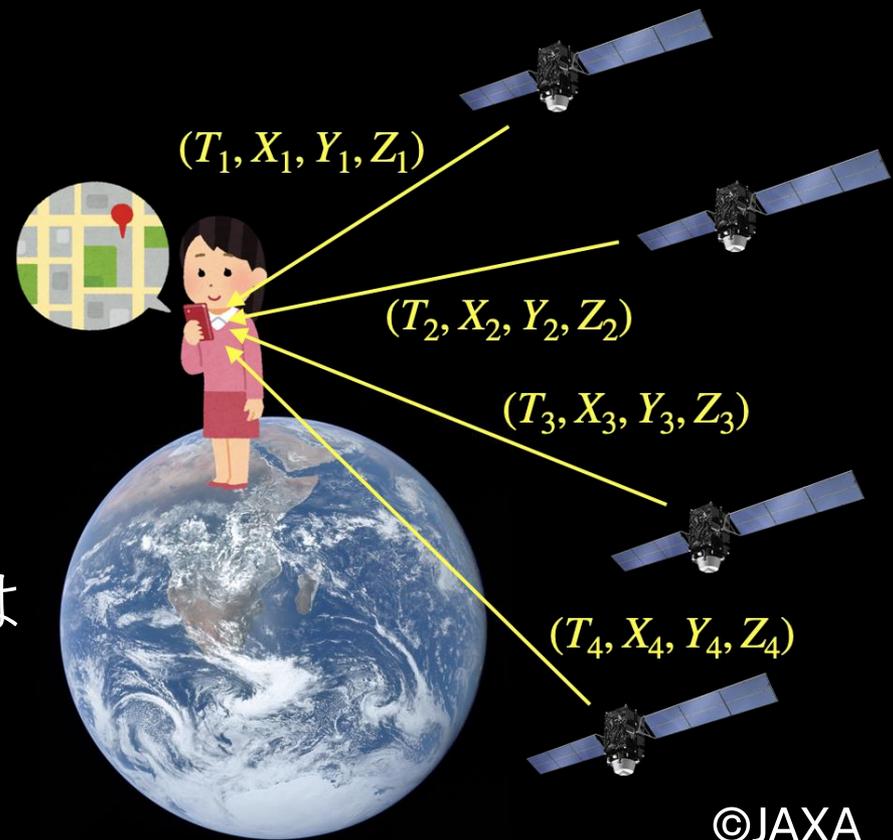
↑  
物体のエネルギー・運動量



# GPSが使えるのも一般相対性理論のおかげ！

各衛星が  
時刻 $T_i$ と位置 $(X_i, Y_i, Z_i)$ を  
電波で伝える。

電波は光速 $c$ で伝わるので  
自分の時刻 $t$ と位置 $(x, y, z)$ は  
次の連立方程式を解くと  
分かる。



$$c^2(t - T_1)^2 = (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2,$$
$$c^2(t - T_2)^2 = (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2,$$

⋮

## 重力波とは

- 時空の歪みが伝わっていく現象
- 物体の運動から発生する  
(いくつか条件がある)
- 光速で伝わる
- ほとんどなんでもすり抜ける

Credit: R, Hurt – Caltech/JPL

最後は1秒に75回転、  
光速の60%くらいの  
速さで衝突

太陽質量の3倍くらい  
のエネルギーが  
重力波として  
出て行った。

地球から約**13億**光年

太陽質量の **$36^{+5}_{-4}$** 倍の  
ブラックホール

太陽質量の **$29^{+4}_{-4}$** 倍の  
ブラックホール

# 当時の心境

まだ駆け出し（修士1年）で達成感は全くなかった。

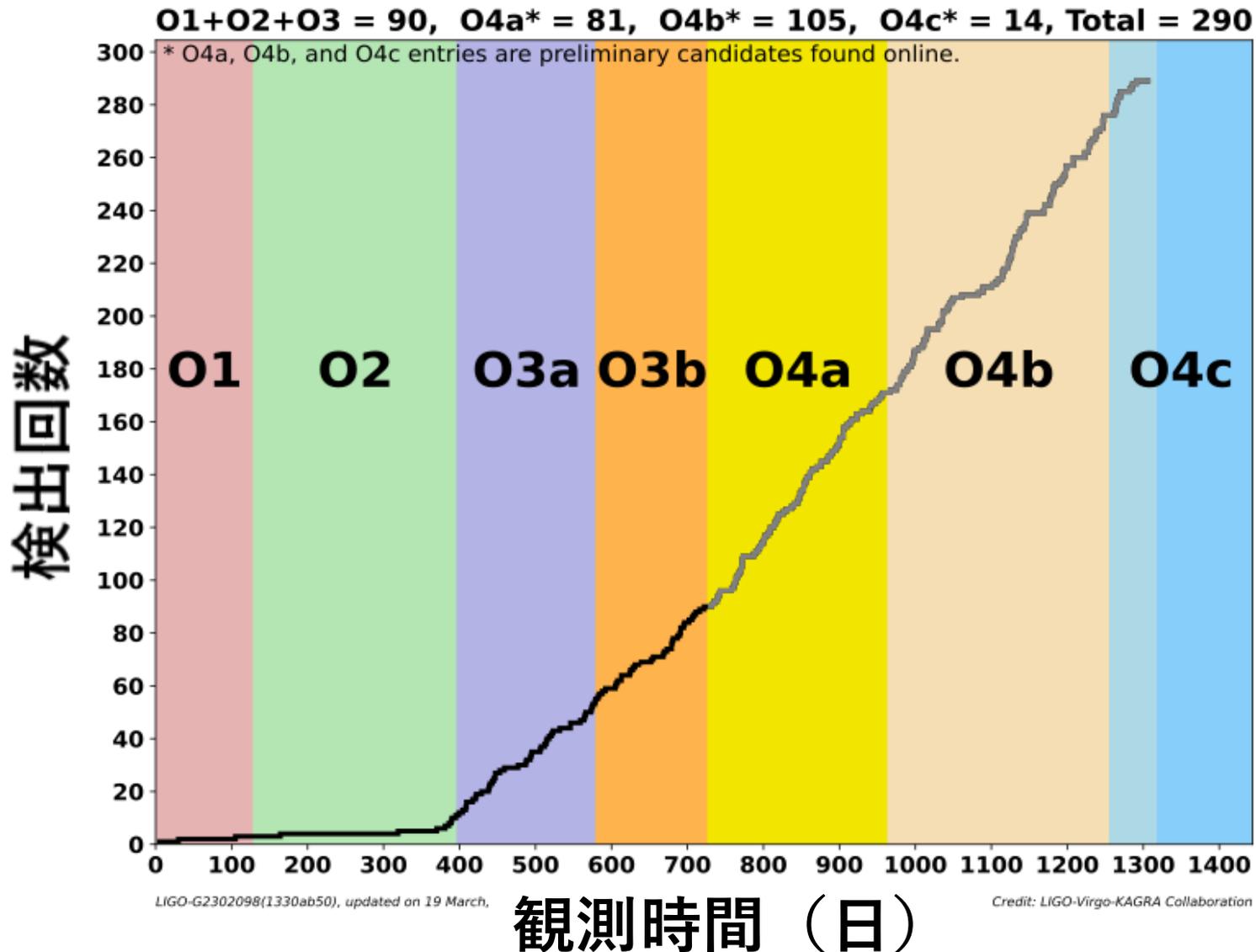
当時は重力波を検出するための検出器雑音除去手法を開発していた。

これからは**実データの解析**と**宇宙物理**に力を入れないといけない。

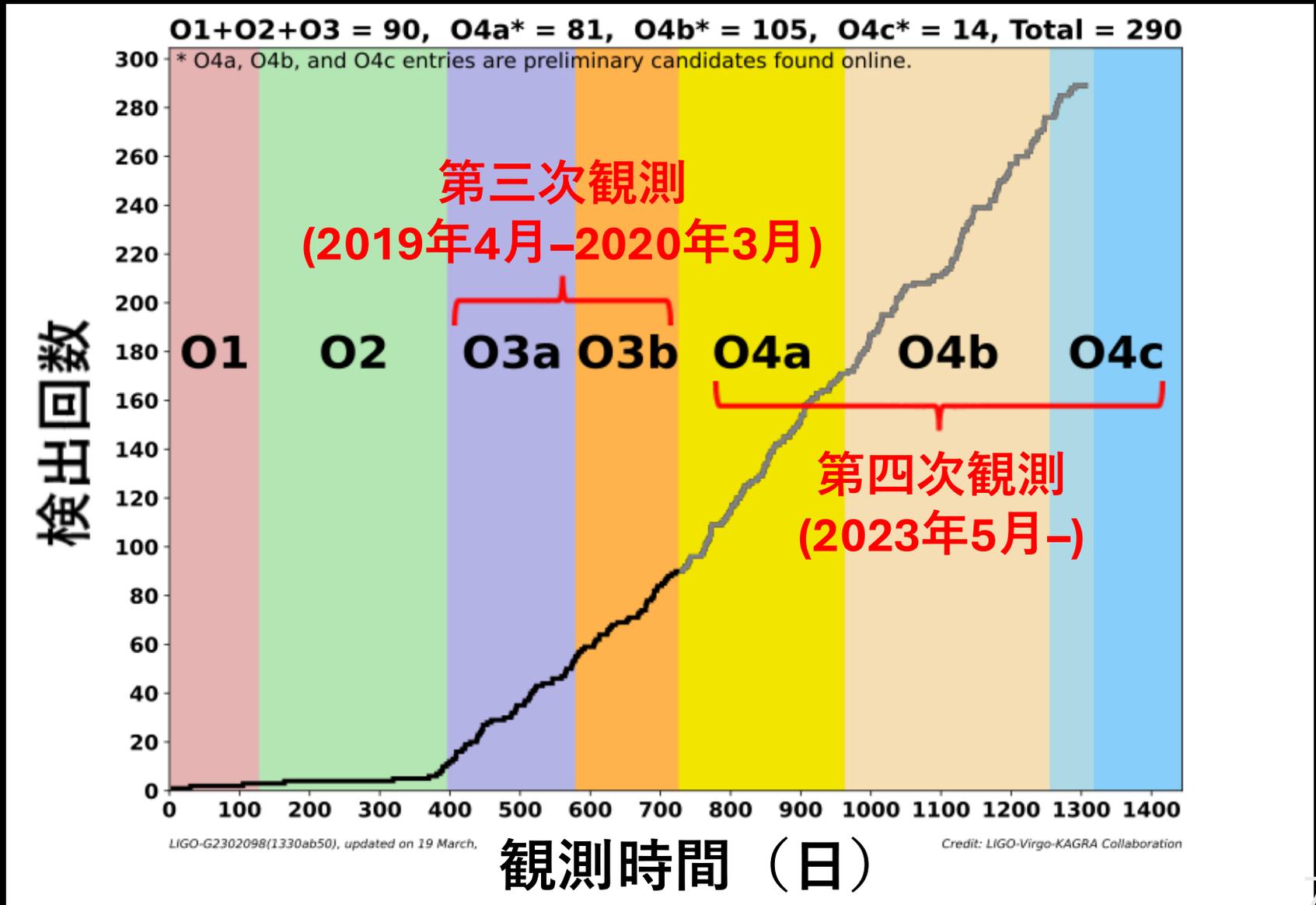


当時の研究発表の様子

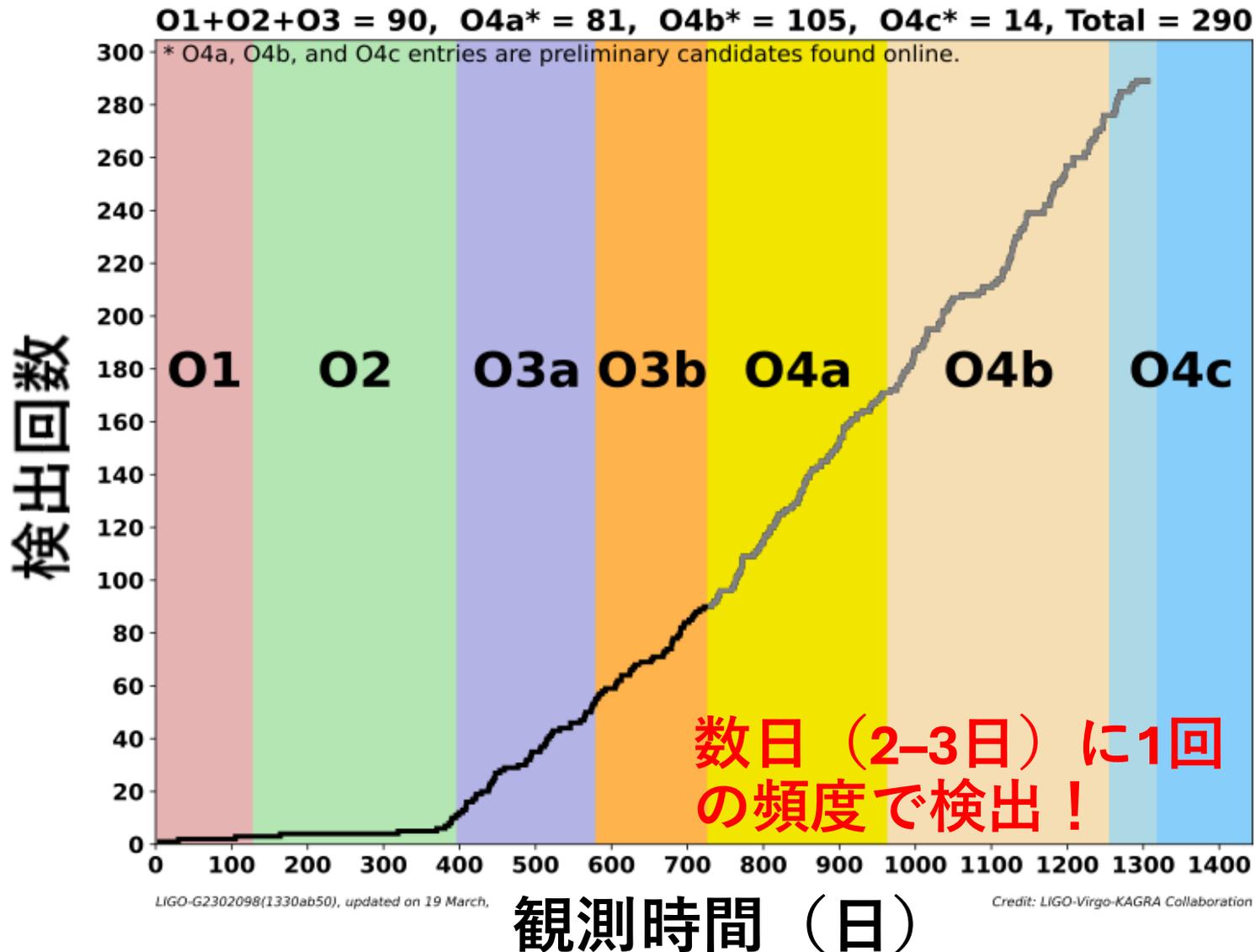
# そして時は流れ...



# そして時は流れ...

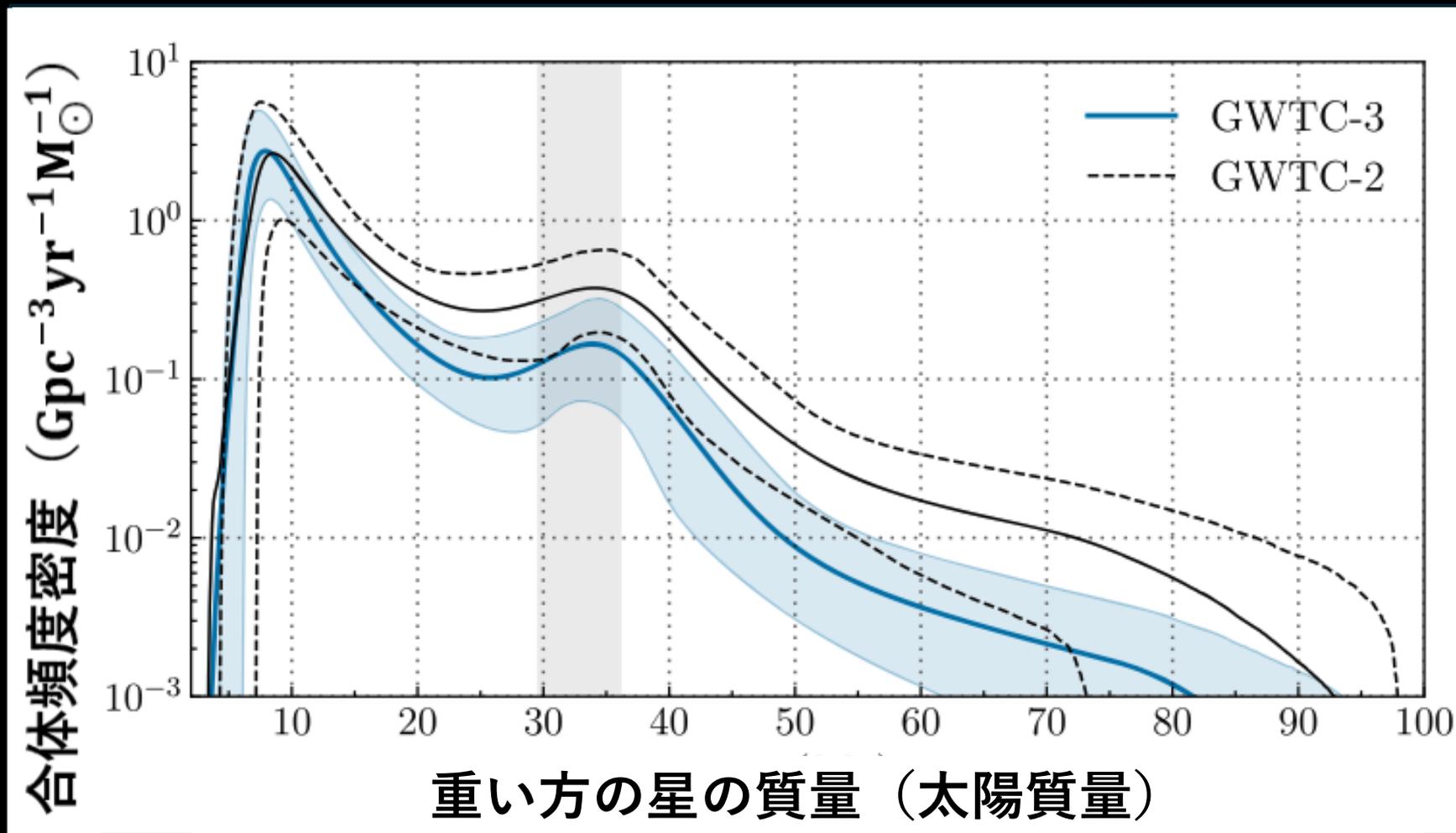


# そして時は流れ...



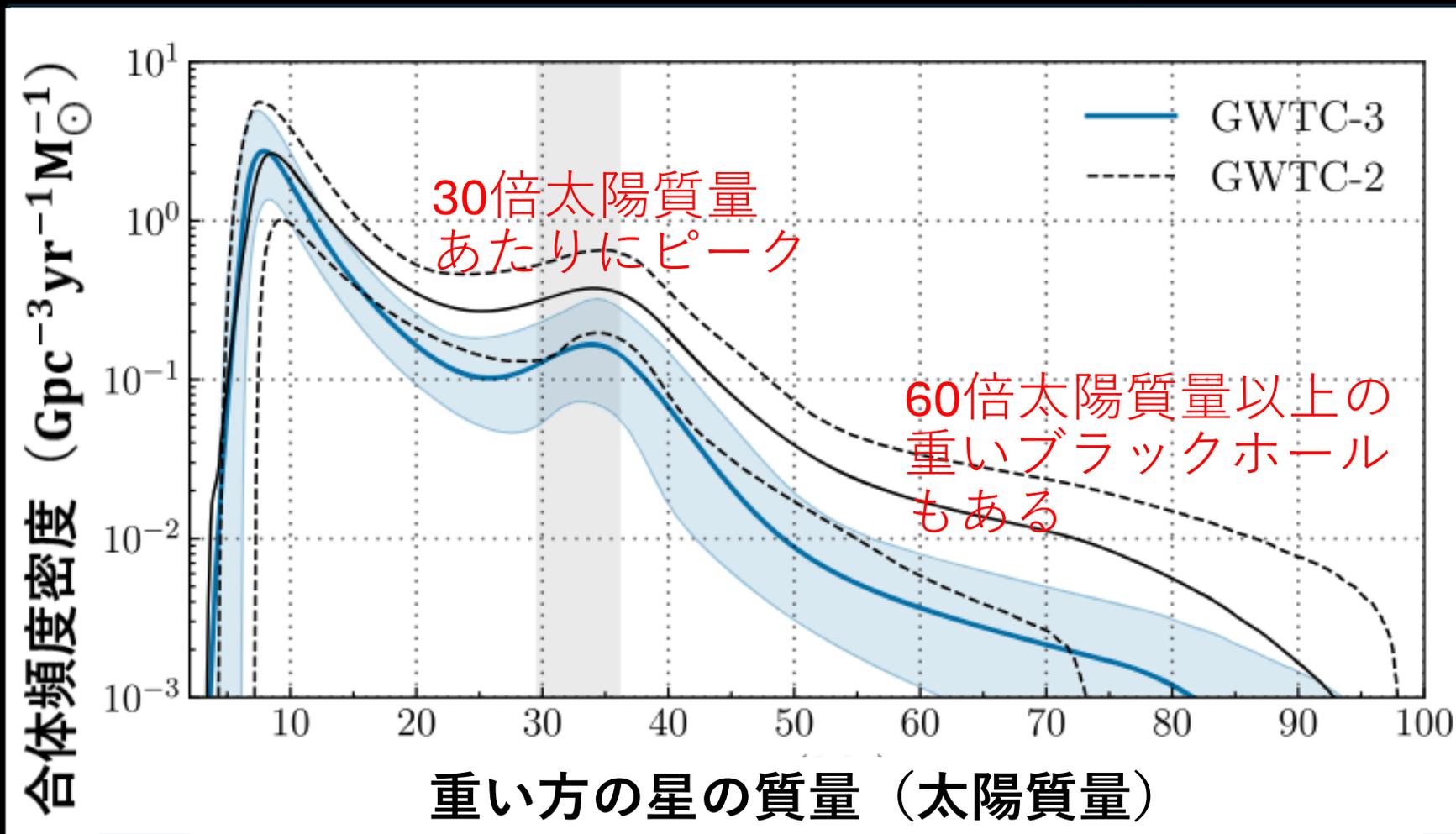
# 連星ブラックホールの起源は？

©LIGO-Virgo-KAGRA (2023)



# 連星ブラックホールの起源は？

©LIGO-Virgo-KAGRA (2023)



# 一般相対性理論は正しいか？

- **波形**は一般相対性理論の予想と合うか？
- **ブラックホールの音色**は一般相対性理論の予言と合うか？
- **偏極の数**は一般相対性理論の予言（2つ）と合うか？

