

ブラックホールと重力波

何がどこまでわかったか

真貝寿明(しんかいひさあき)
大阪工業大学情報科学部

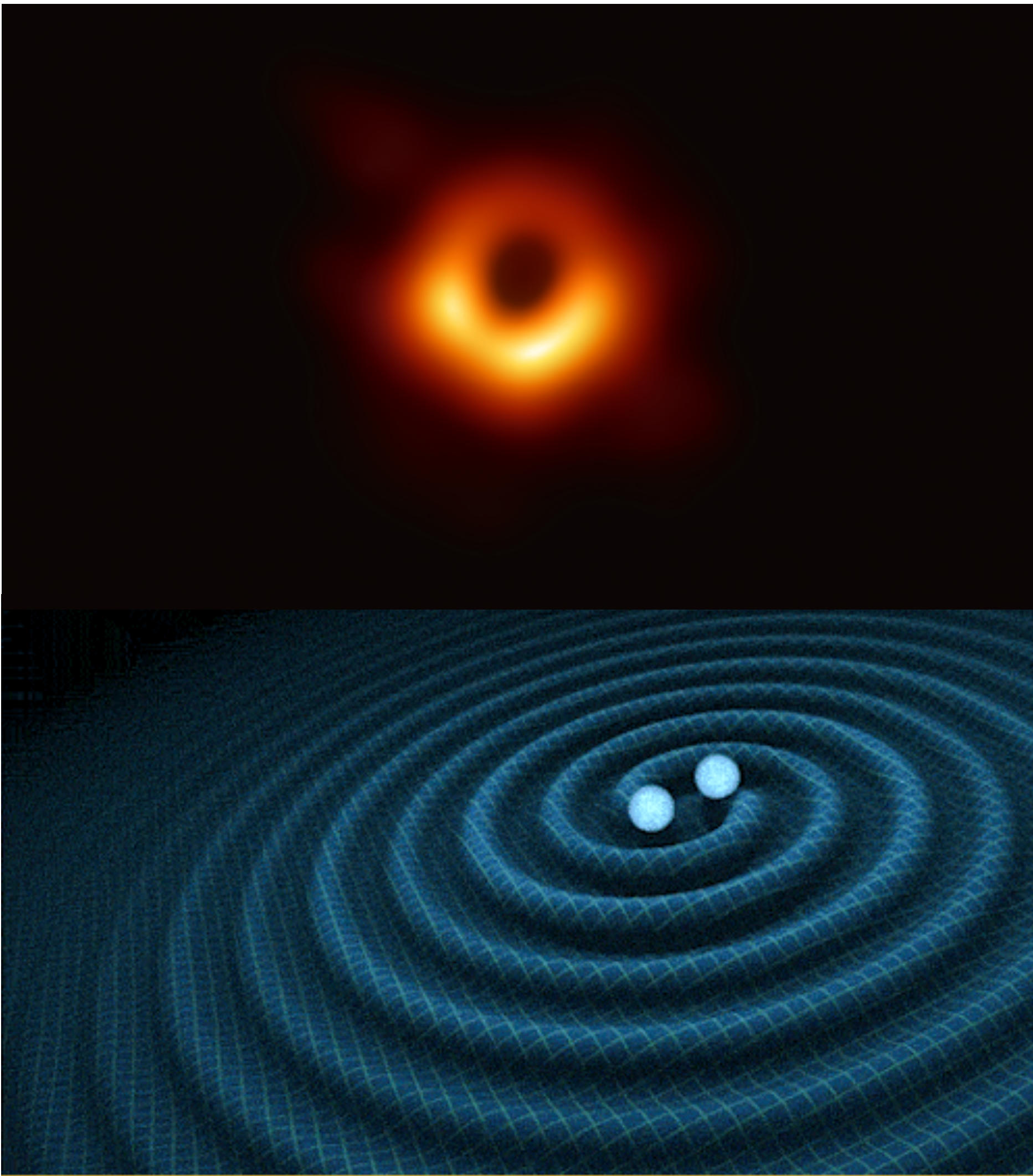


1. 相対性理論の話
2. ブラックホールの話
3. 重力波の話



このスライドの取得先

https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202508_Akashi.pdf



極限時空 ブラックホールと重力波



2025年7月19日～8月31日

@ Osaka Science Museum 大阪市立科学館 <https://www.sci-museum.jp/>



2025年7月19日～9月7日

@ Akashi Municipal Planetarium 明石市立天文科学館 <https://www.am12.jp>



2025年7月26日～10月13日

@ Sendai Astronomical Observatory 仙台市天文台 <https://www.sendai-astro.jp>



2026年冬 Winter

@ Hamagin Space Science Center はまぎんこども宇宙科学館（横浜） <https://www.hamagin-science.jp>



2027年3月～5月

@ Toyama Science Museum 富山市科学博物館 <http://www.tsm.toyama.toyama.jp>



2027年夏から秋 Summer to Fall

@ Ehime Prefectural Science Museum 愛媛県総合科学博物館 <https://www.i-kahaku.jp>



2028年12月より3ヶ月（予定）

@ National Museum of Nature and Science 国立科学博物館 <https://www.kahaku.go.jp>



やさしく解説編



小学生向け (小学4年生以上)

ブラックホールと重力波

ブラックホールと重力波



詳しく解説バージョン



一般向け

ブラックホールと重力波

ブラックホールと重力波



本気で解説バージョン



理系大学生向け

ブラックホールと重力波

理系大学生向け

《本気で解説編》

理系大学生向け

1 相対性理論

ブラックホールも重力波も Einstein^{*1}が提唱した一般相対性理論の産物である。どちらも理論的に予言されているが、その実在が認められるまでに 50 年、実際に直接観測されるまでに 100 年を要した。まずは、相対性理論の概略を見てみよう。

第 1 章のまとめ

- 相対性理論は 2 つの理論から成り立っている。特殊相対性理論（1905 年）と、一般相対性理論（1915 年）である。どちらも Einstein が一人で構築したもので、物理学史のなかでも稀有な発展をした理論である。
- 特殊相対性理論は、物体の運動が光速に近いときの運動法則で、物理法則は空間 3 次元と時間を含めた 4 次元時空で考えなければならないことを述べた理論。その帰結は「時間の進み方は運動状態によって異なること」、「自然界の最高速度は光速であること」「質量エネルギー（ $E = mc^2$ ）の存在」など。
- 一般相対性理論は、重力に関する理論で、大きな質量があると空間がゆがみ、そのゆがみに沿って物体が動くことが重力の源であるとする。その帰結は「ブラックホールの存在」「重力波の存在」「膨張宇宙」など。

1.1 特殊相対性理論

相対性理論の目的は、物理法則を座標系の取り方によらない形式に（共変的な形式に）記述することにあった。Newton の運動法則は、慣性座標系^{*2}の間であれば、座標変換をしても形を変えない。このことを、慣性座標系間の座標変換に対して不変、あるいは Galilei^{*3}変換に対して不変、という。Newton ^{*4}力学では、「時間」は観測者によらず全宇宙に一様に流れる「絶対時間」であることが暗黙に仮定されており、「空間」も自然法則を最も簡潔に表す「絶対空間」が存在すると信じられていた。

■電磁気学の矛盾

電流のまわりには磁場が発生する。磁場が変化すると電流が発生する。このような電場と磁場の相互作用は、電磁気学としてまとめられた。Maxwell^{*5} がまとめた電磁気学の方程式（実際には Heaviside^{*6}による表記）は次のようになる。

電磁気学の基本方程式（1864）

電場と磁場の相互作用は、次の 4 本の方程式にまとめられる。 $\boldsymbol{E}$ を電場ベクトル、 $\boldsymbol{B}$ を磁場ベクトル、 ρ を電荷密度、 $\boldsymbol{j}$ を電流密度ベクトル、 c を光速とする。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 4\pi\rho, \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \tag{2}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \boldsymbol{j}, \tag{3}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = 0. \tag{4}$$

ここで、 ∇ は微分演算子で、 $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})^T$ である。

(1) はガウスの法則、(2) は単磁極が存在しない式、(3) 式は電場の変化が磁場を変化させる、(4) 式は磁場の変化が電場を変

小学生向け

！．アインシュタインと相対せい理ろん
小さいころの
アイんシュタイ
ンは、あまり元
氣な子どもでは
なかったんだ。
でも、父親にも
らった方位じし
んがいつも南北
を指しているの
がふしぎで、そ
こから物理にき



図 1. アルバート・アインシュタイン。1905

年ころ。イラストは参考文献[1]より。

《詳しく解説編》

一般向け

一般向け

1 重力とは何か

1.1 万有引力

ブラックホールや、重力波は、私たちの身近にある「重力」が引き起こす物理現象です。ニュートン^{*1}は、「万有引力」が重力の正体である、と説明しました。

万有引力の法則

- すべての質量のある物体は、引力をおよぼしあう。
- 質量 M と m の 2 つの物体が、距離 r はなれているとき、引力 F の大きさは、

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \tag{1}$$

で表される。ここで、 G は万有引力定数と呼ばれ、その値は、 $G = 6.6743 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$ である。

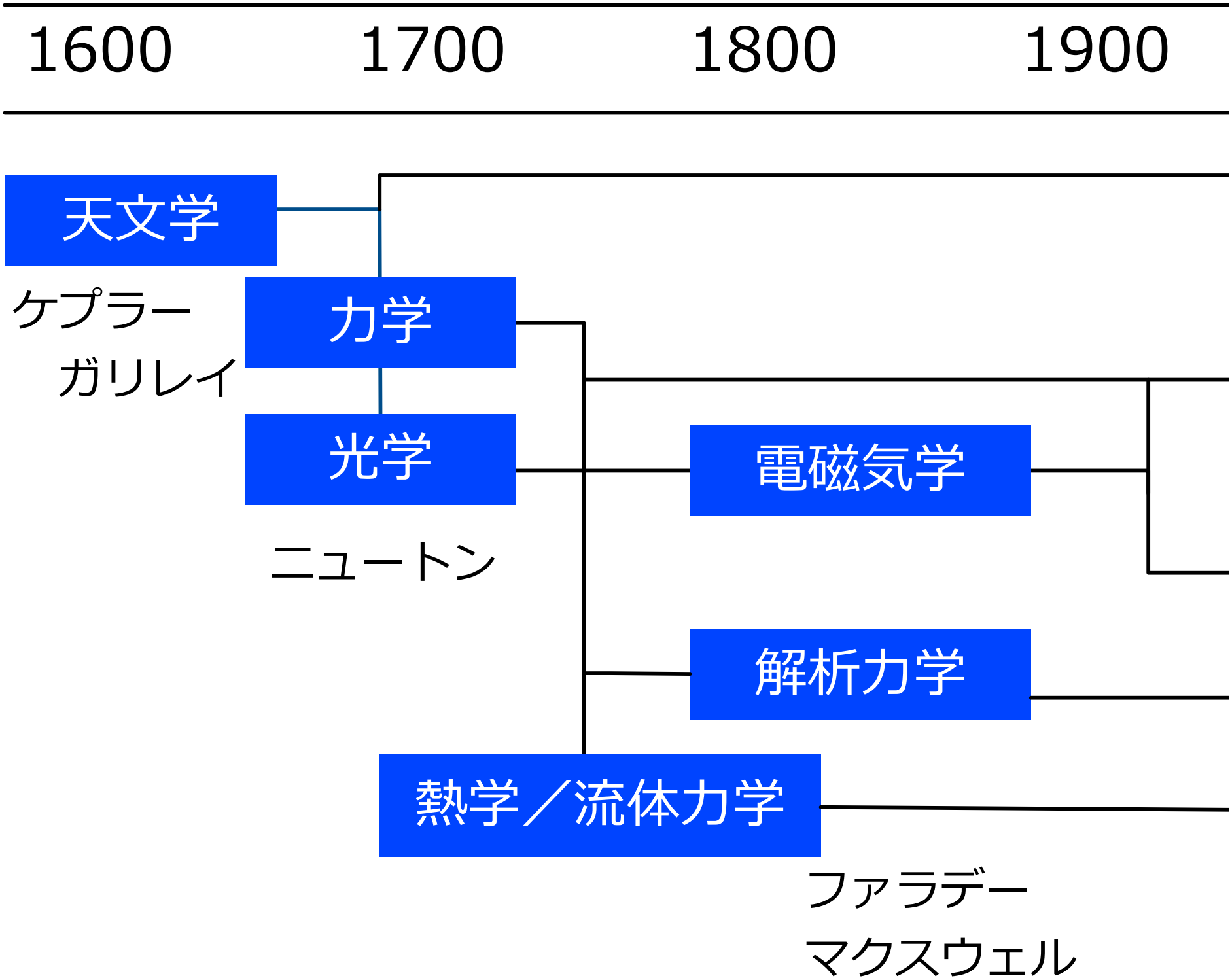
これは、高校の物理の教科書に書かれている式です。このような万有引力があると考えると、地球上の重力の大きさが計算でき、太陽系の惑星が楕円軌道を描いて公転することも説明できます。

しかし、ニュートンの説明から 200 年あまりが過ぎた頃、重力は「力」ではなく「空間のゆがみ」である、と説明する理論が現れました。アインシュタイン^{*2}の相対性理論です。相対性理論によると、時間の進み方（1 秒の長さ）は、観測する人の運動状態によって伸び縮みして、質量の大きな天体のまわりでは空間がゆがむことになります。また、あまりに大きな質量の天体が小さな領域に発生すると、光でさえも抜け出せないブラックホールとなることが予言されました。さらに、空間のゆがみが、光の速さで宇宙空間を波のように伝播していく重力波の存在も予言されました。そして、アインシュタインの予言から 100 年がたち、私たちはようやく、ブラックホールを撮影することができ、重力波を観測することができるようになりました。

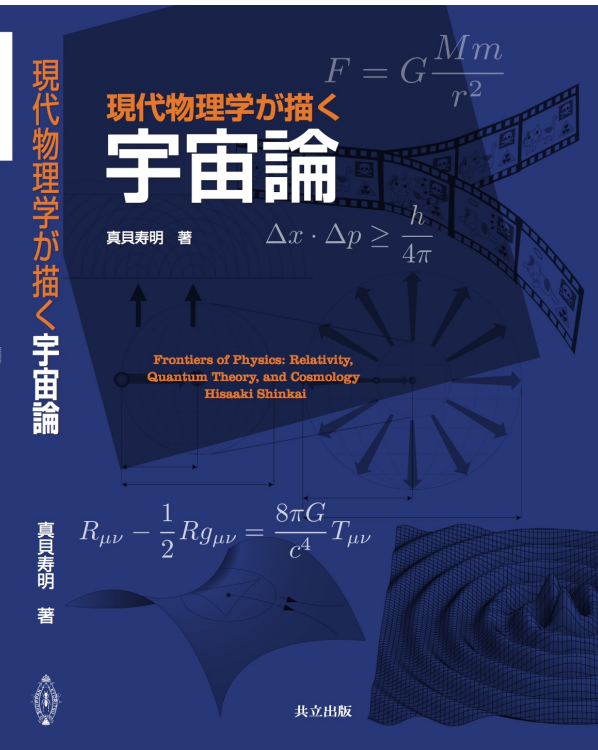
相対性理論を太陽程度の星に適用すると、万有引力の式が出てきます。ですから、ニュートンが間違っていたわけではありません。より大きな枠組みで物理学

^{*1} Sir Isaac Newton (1642-1727)

近代物理学の進展



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。



相対性理論 = 時間と空間の物理学

光の速度を一定と考えると
動いている人の時間の進み方
は、遅くなる



アインシュタイン(26歳)

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

力を加えると、物体は動く
(加速度が生じる)



ニュートン(1642-1717)

一般相対性理論

強い重力場での時空の力学
「空間が歪むのが重力の正体である」

時間は伸び縮みする

光の速度を一定と考えると
動いている人の時間の進み方
は、遅くなる

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」



アインシュタイン
(36歳)

空間も伸び縮みする

ニュートン力学

$$F = ma$$



アインシュタイン(26歳)

ニュートン：リンゴはなぜ落ちる？



<http://hikingartist.com/>



万有引力の法則

すべてのものは、引力で引き合う

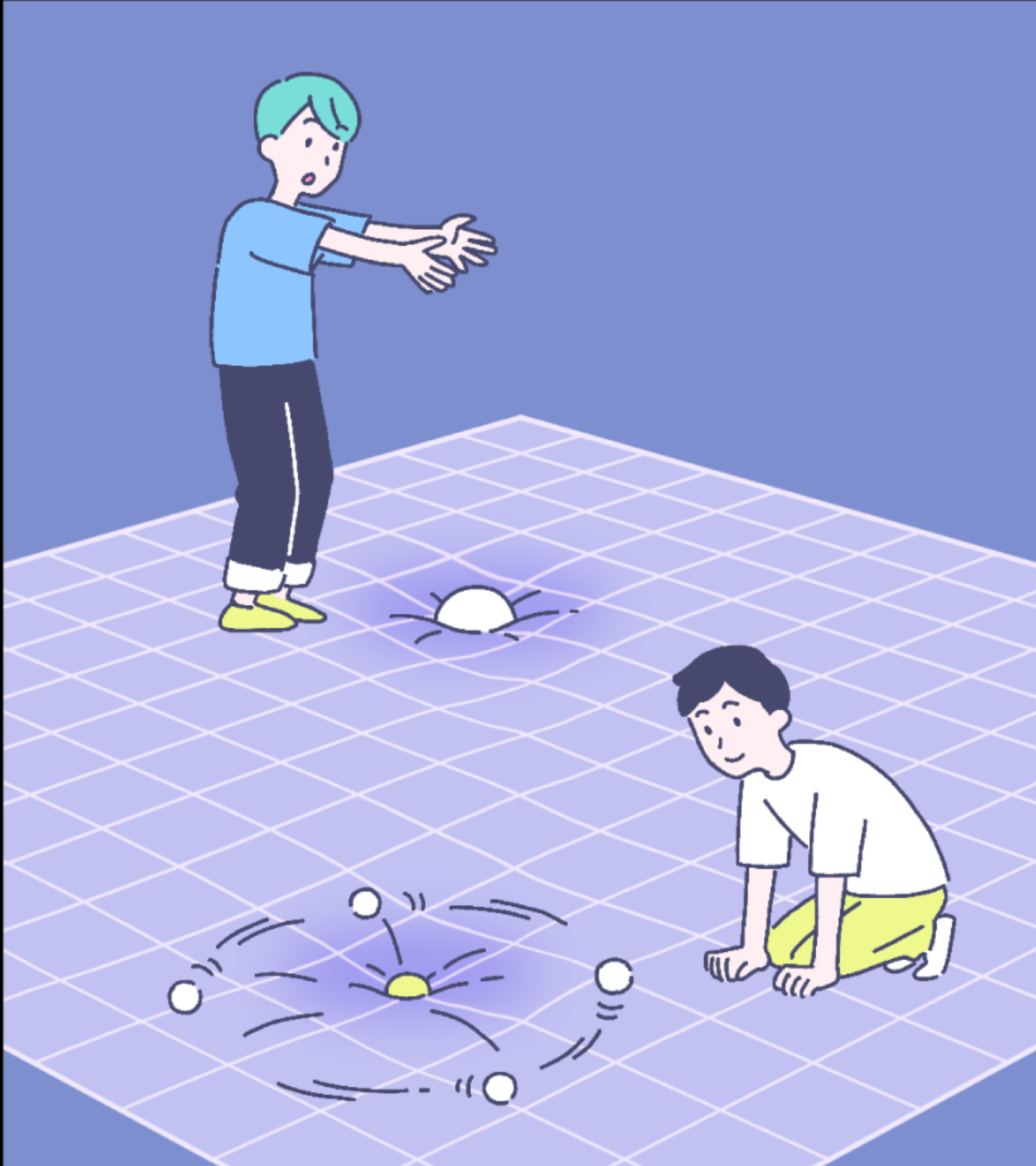
◆ Advanced 万有引力の法則

質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.2)$$

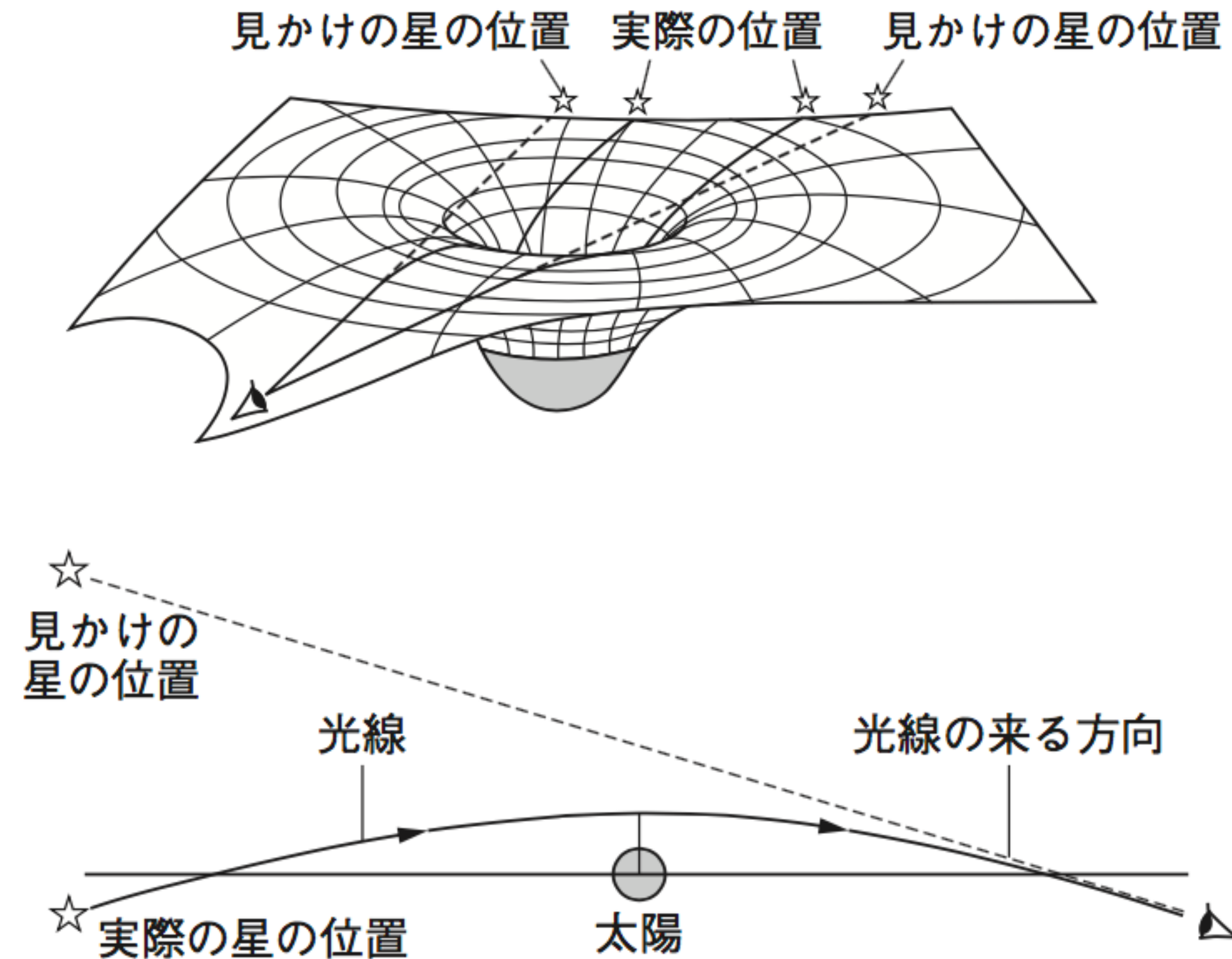
でつねに引力である． G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ．

ブラックホール

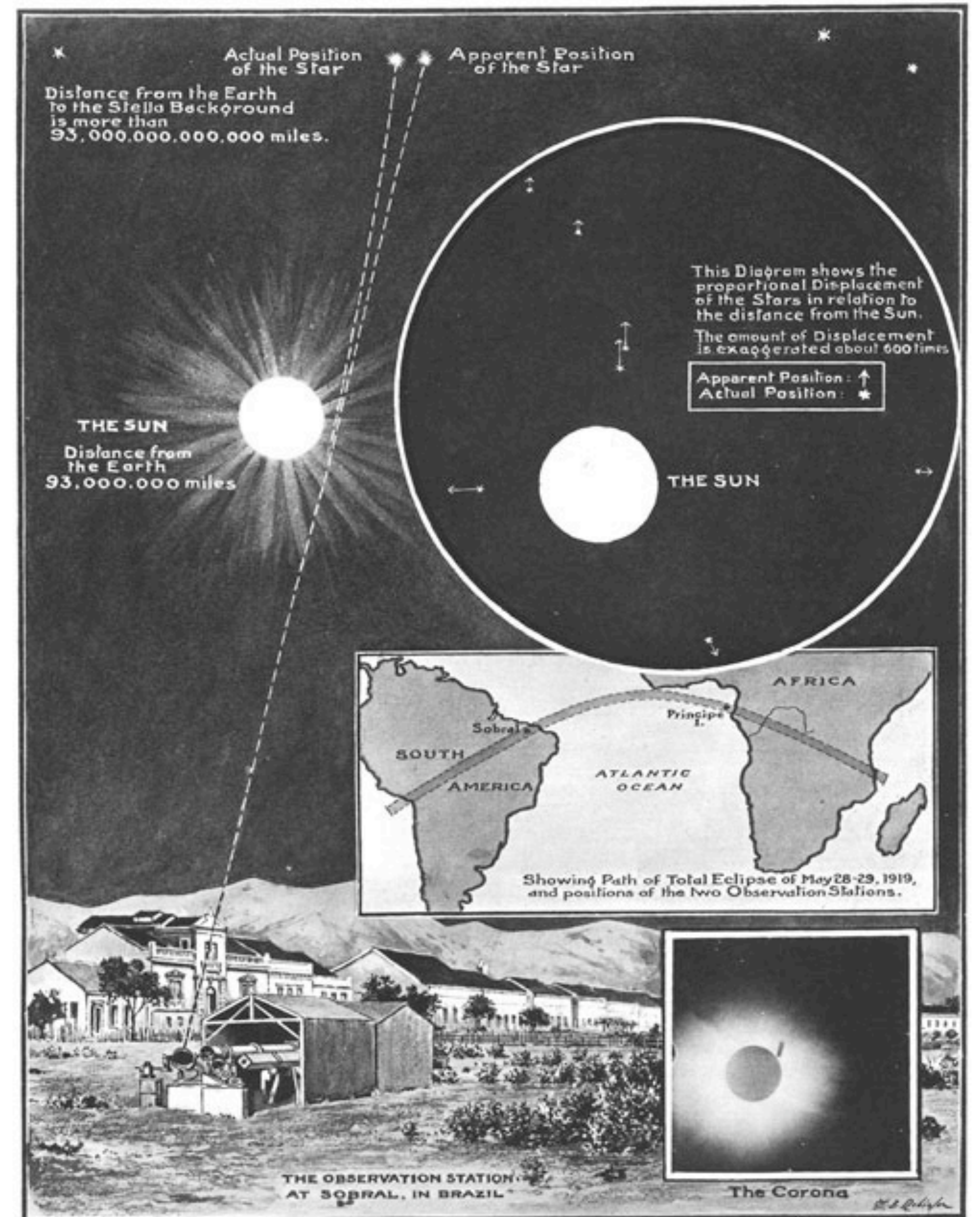


一般相対性理論は「空間が曲がる」ことが重力の原因」と説明する理論

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



1919年5月の皆既日食で
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が
普段の位置とずれていた



Sの科学 Yの科学

Sの科学

physic**s** 物理
mathematic**s** 数学
statistic**s** 統計学
genetic**s** 遺伝学

Yの科学

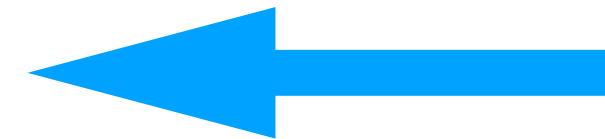
astronom**y** 天文学
econom**y** 経済学
biolog**y** 生物学
archaeolog**y** 考古学
anthropolog**y** 人類学
sociolog**y** 社会学

体系化の学問

対象物の性質を理論で説明

発見の学問

対象物を分類し記載



相対性理論

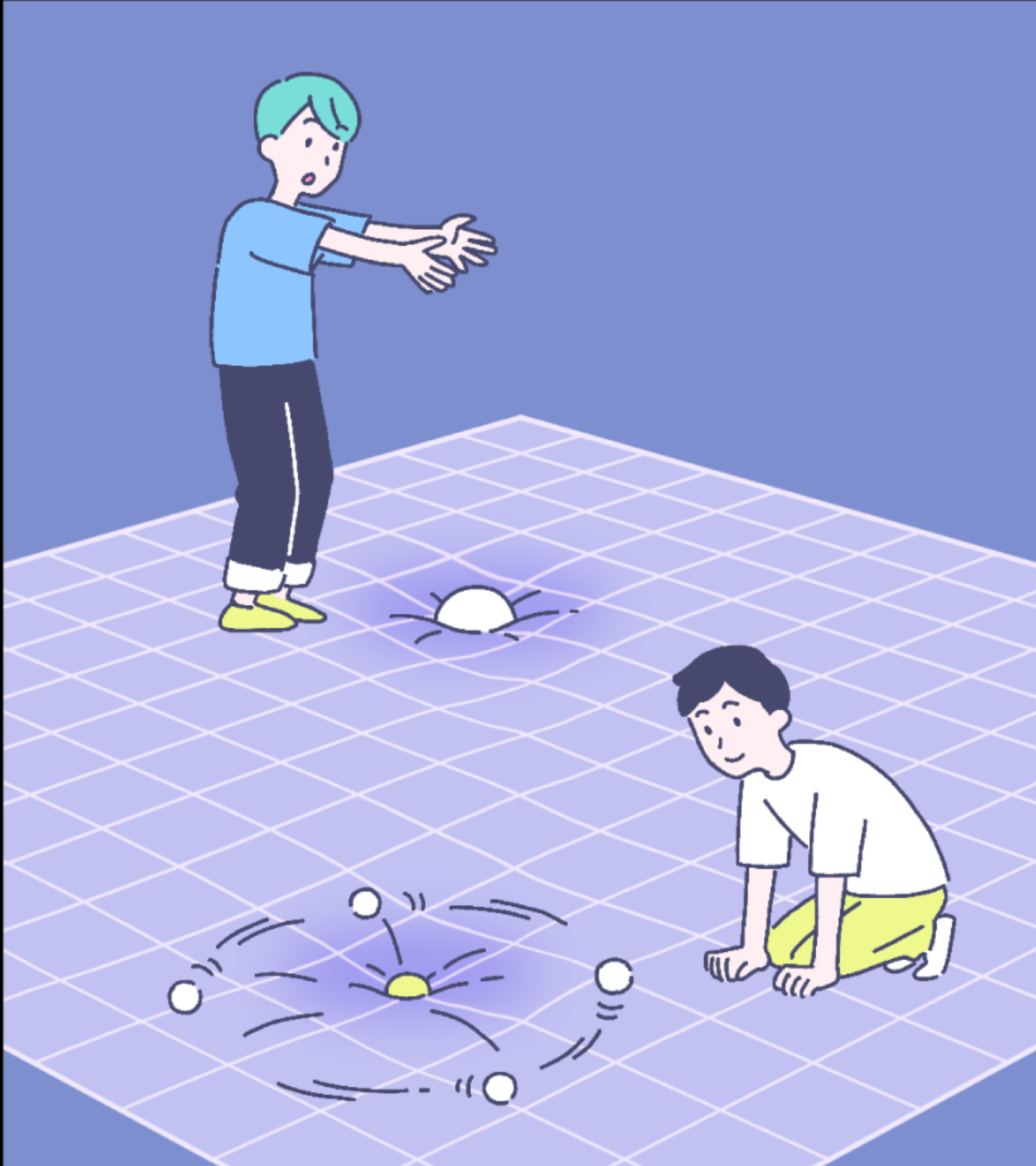


ブラックホール

膨張宇宙

重力波

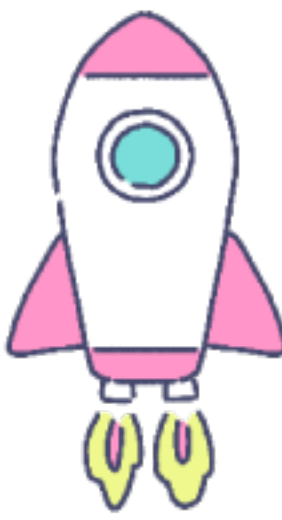
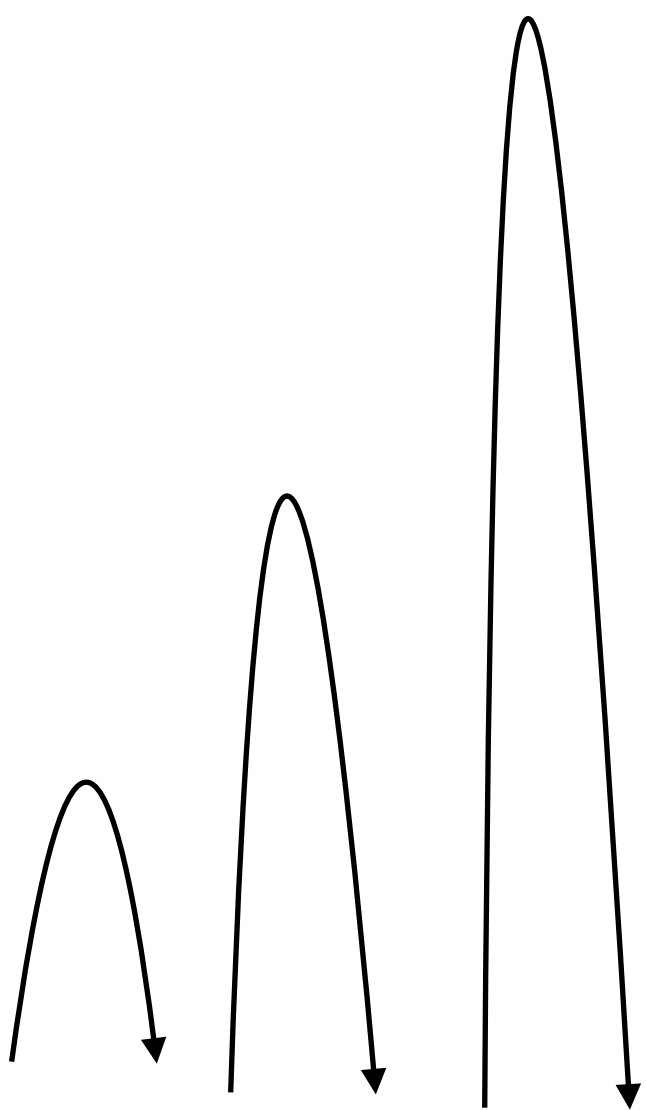
ブラックホール



光も脱出できない天体とは・・・

とてつもなく 重くて小さな天体では

ボールを速く投げ上げると
高くまで飛ぶ

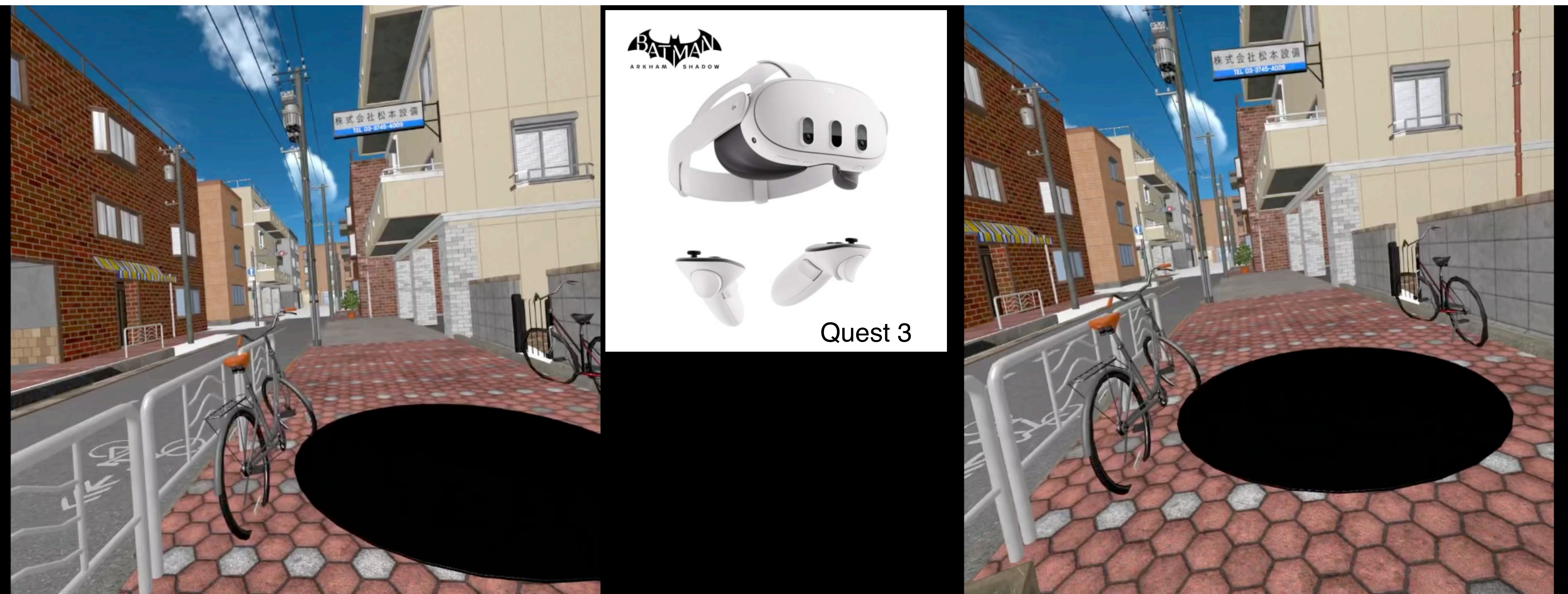


地球からの脱出速度
秒速 12 km

VR game: EscapeFromEarth (Jump up and try to escape from the Earth)

Original

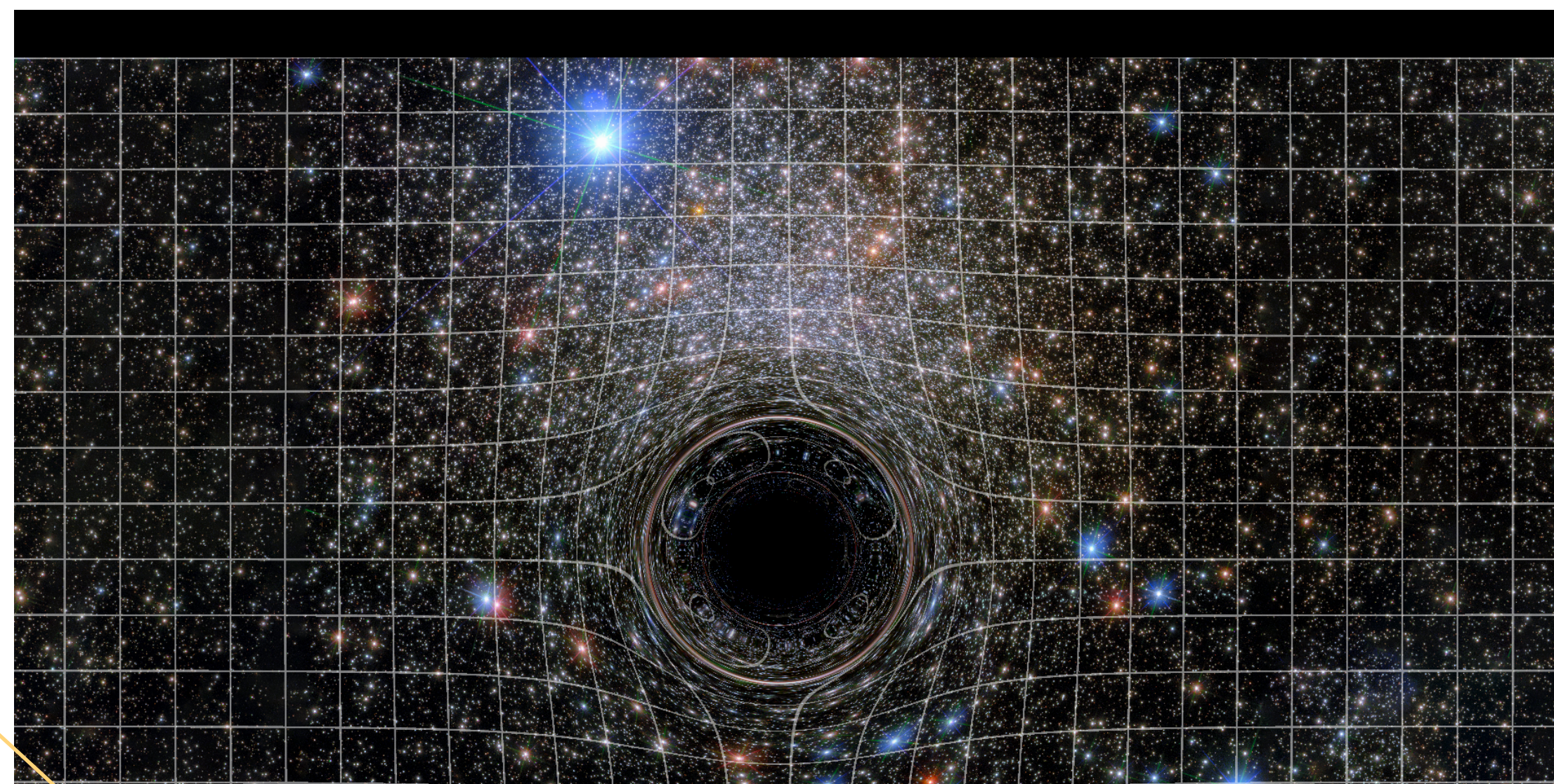
by Satoru Nishiguchi (OIT)



Try jump up once.

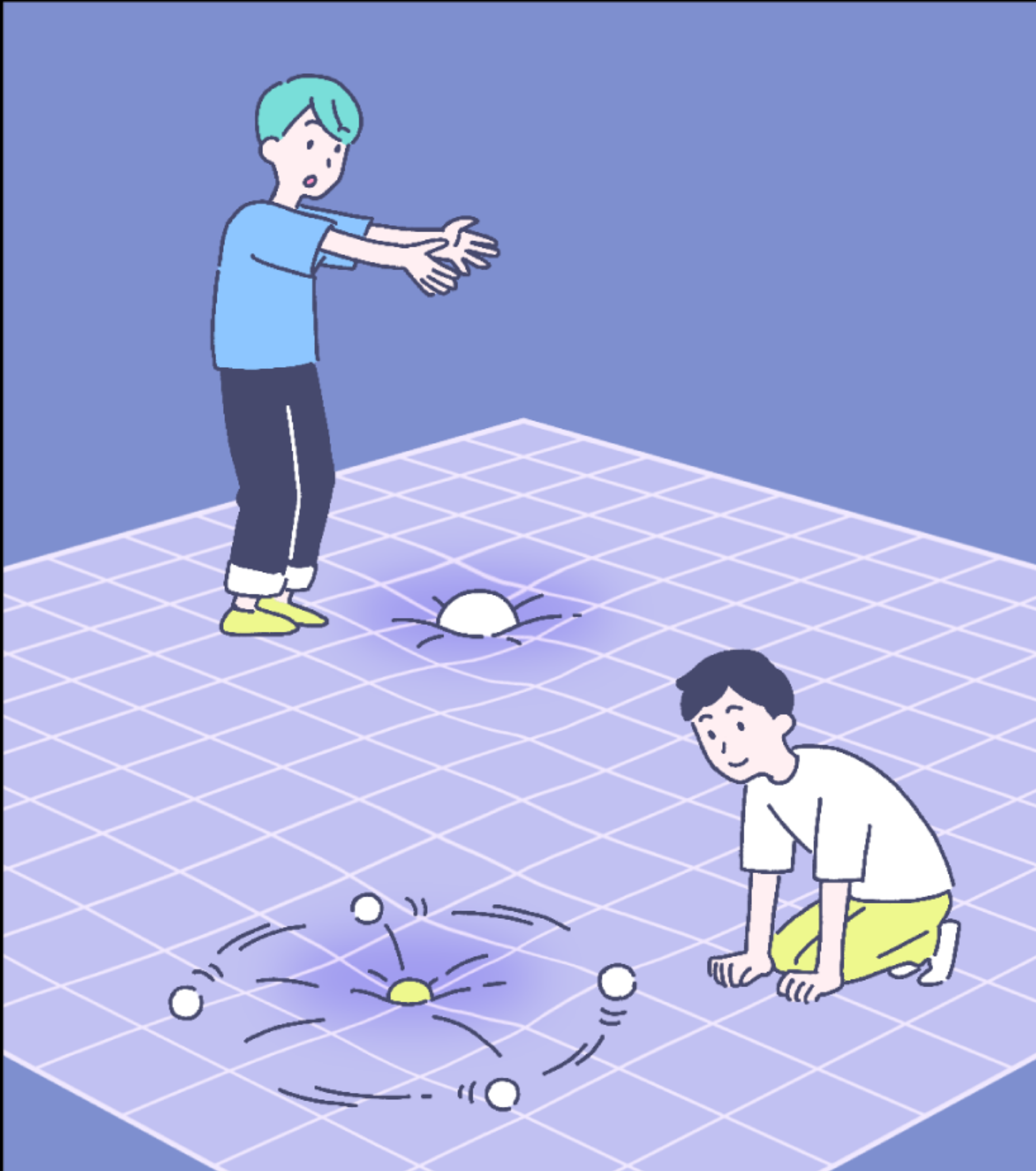
Using that acceleration data, user will view if he/she can escape the Earth at the second jump.

ブラックホールによる重力レンズ効果



ブラックホールの周りで
光は曲がる

ブラックホール



ブラックホール

= 重力が強すぎて 光さえも出られない天体

= 因果的に隔離される領域 境界=地平面(ホライズン)

重い物体のまわりでは
時空がゆがむ

非常に重い物体の
まわりでは時空が
大きくゆがんで
ブラックホールになる

光さえも脱出できない
巨大な重力をもつ
こんな天体を
「ブラックホール」と命名
しよう

ここから内側からは光さえも外向きに
脱出できない
= 事象の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

(M : 物体の質量 G : 重力定数 c : 光速)

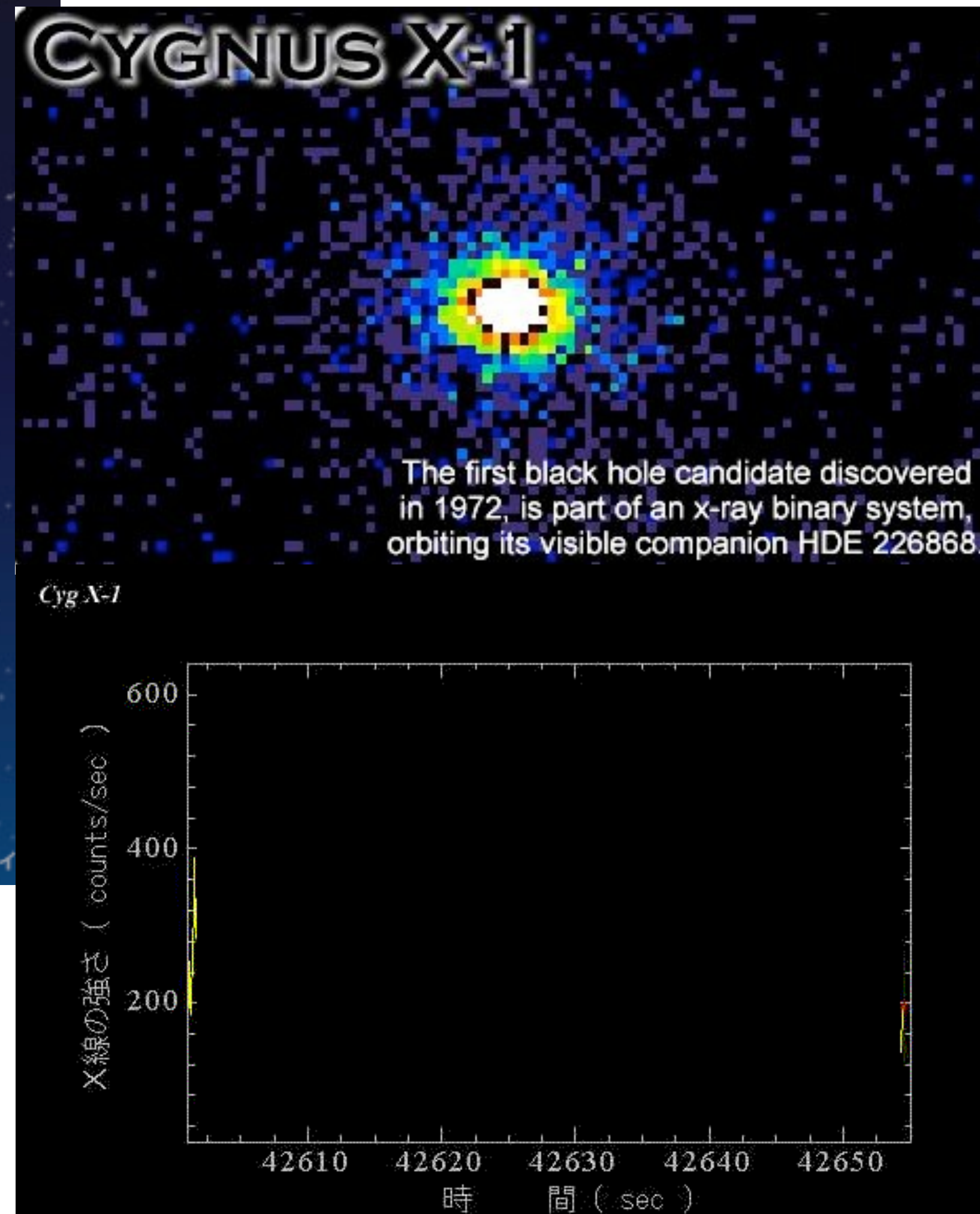
太陽なら半径3km 地球なら半径
9mmにそれぞれの全質量を
押しこめば ブラックホールになる

ホイーラー
命名者については諸説あります

ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？

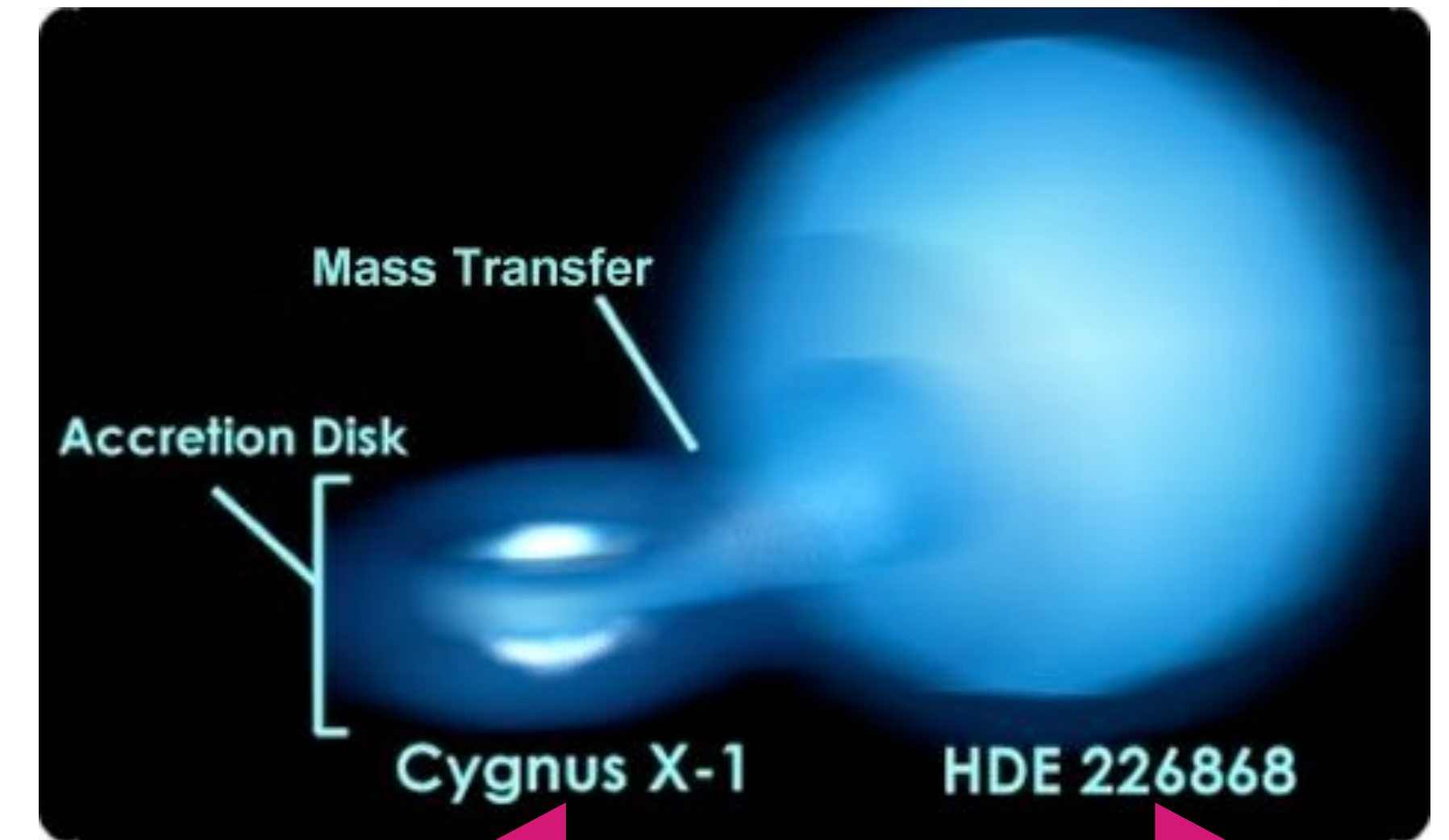


6000光年先



はくちょう座 X-1 の光度曲線 (energy band 1-37keV)

想像図



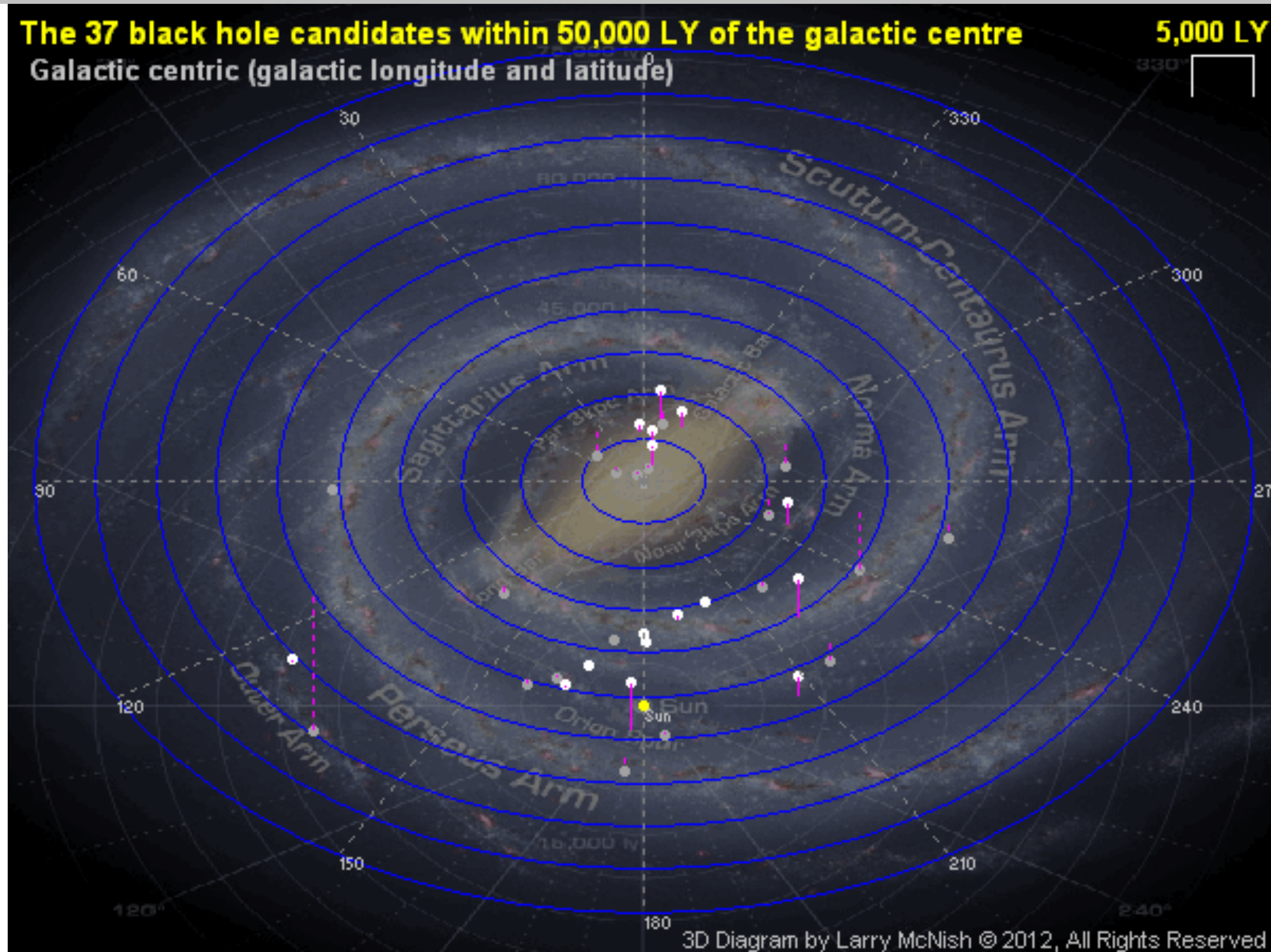
光の速さで1秒以下
(地球7.5周以下)
質量は太陽の10倍以上

重くて小さな天体

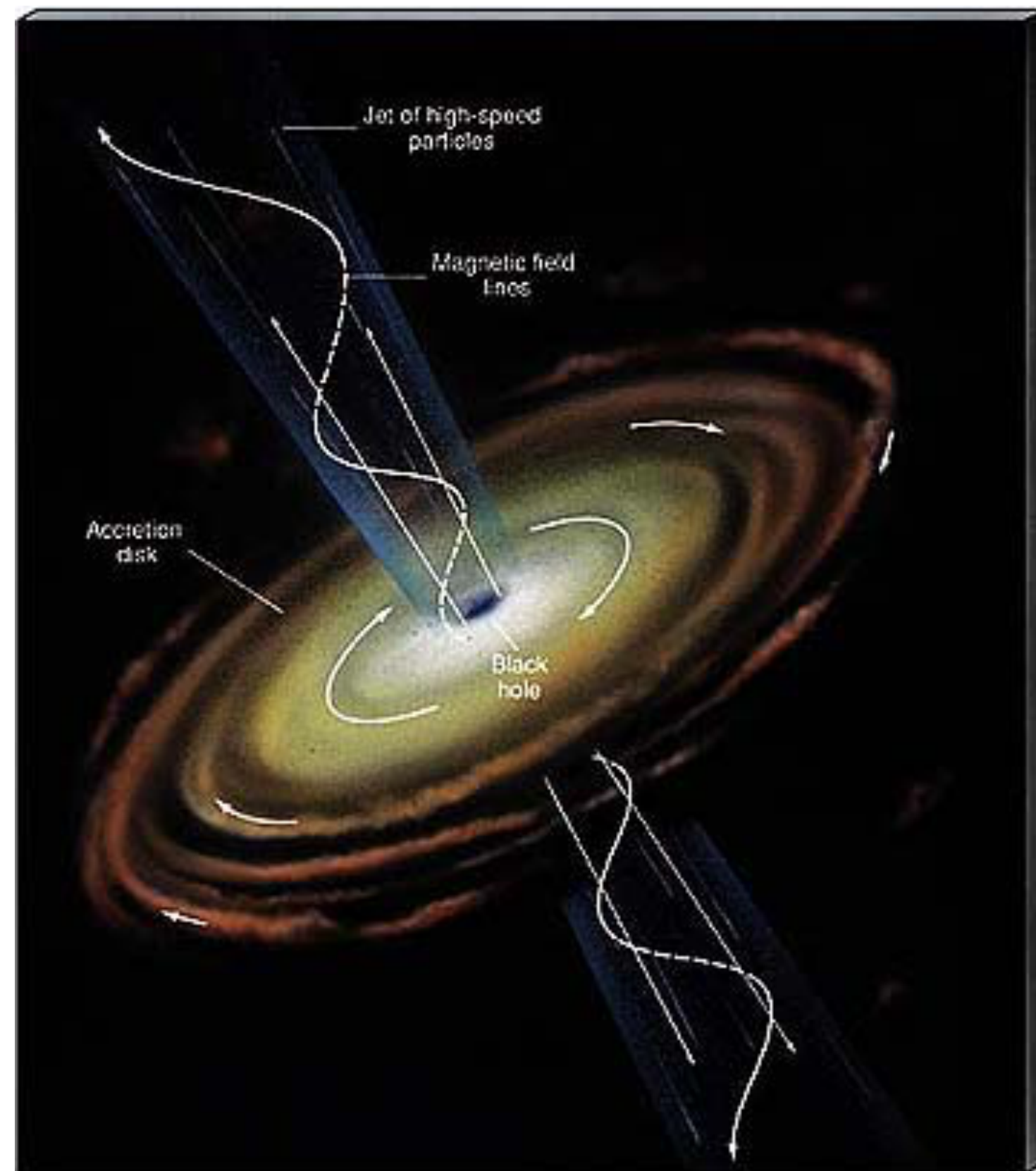
はくちょう座 X-1 はブラックホール

ブラックホール候補天体は50以上

<http://calgary.rasc.ca/blackholes.htm>



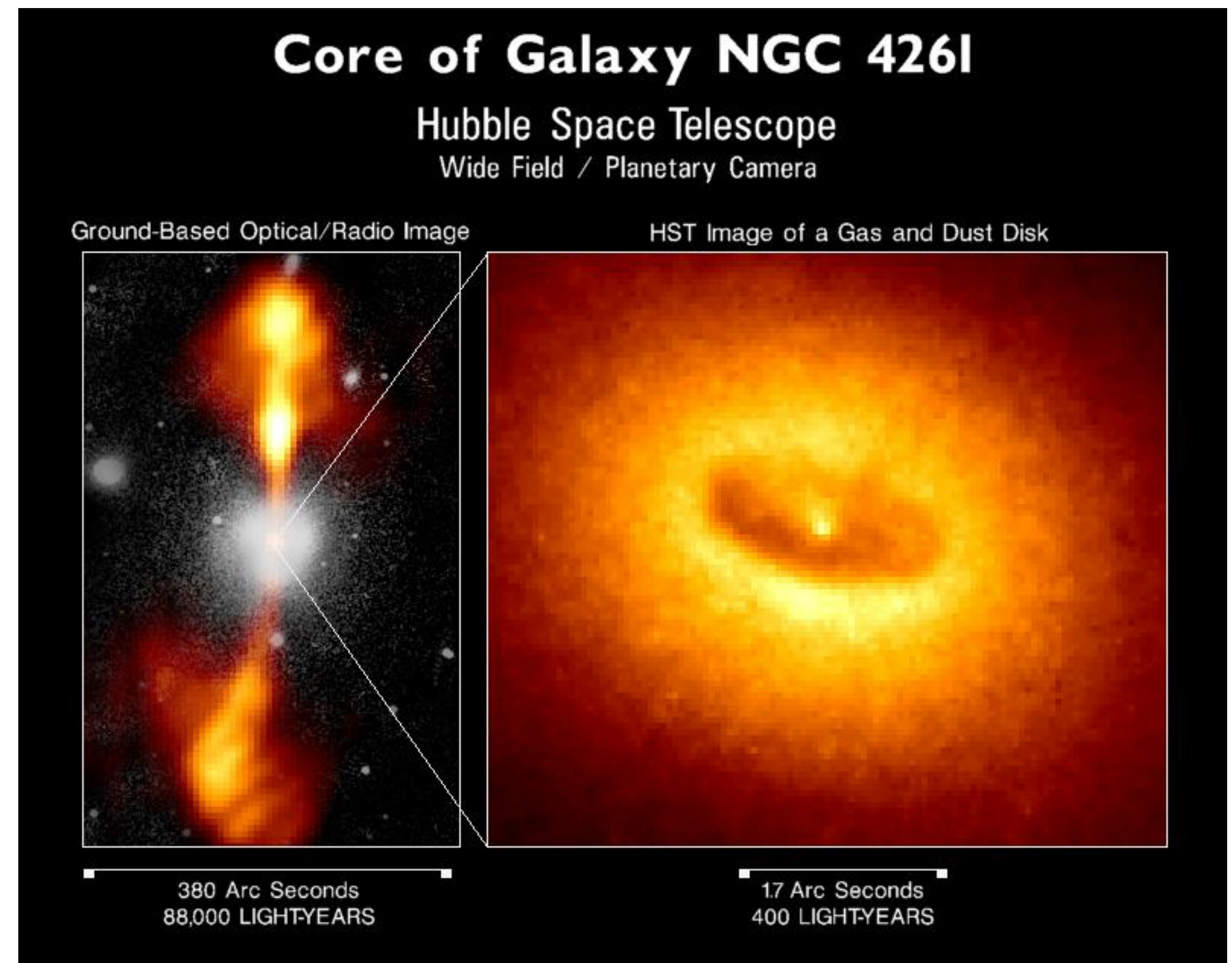
ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？



<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html>

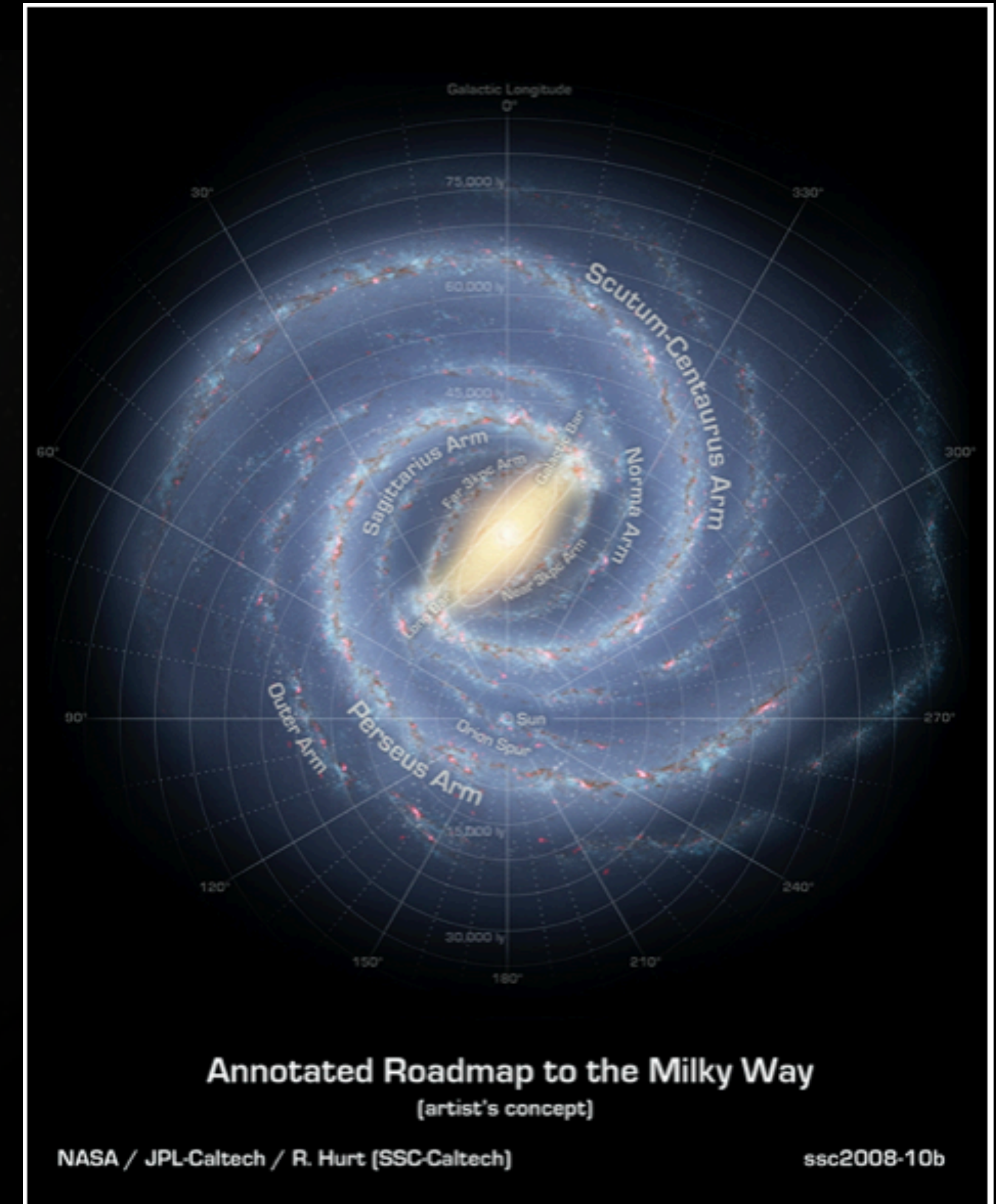
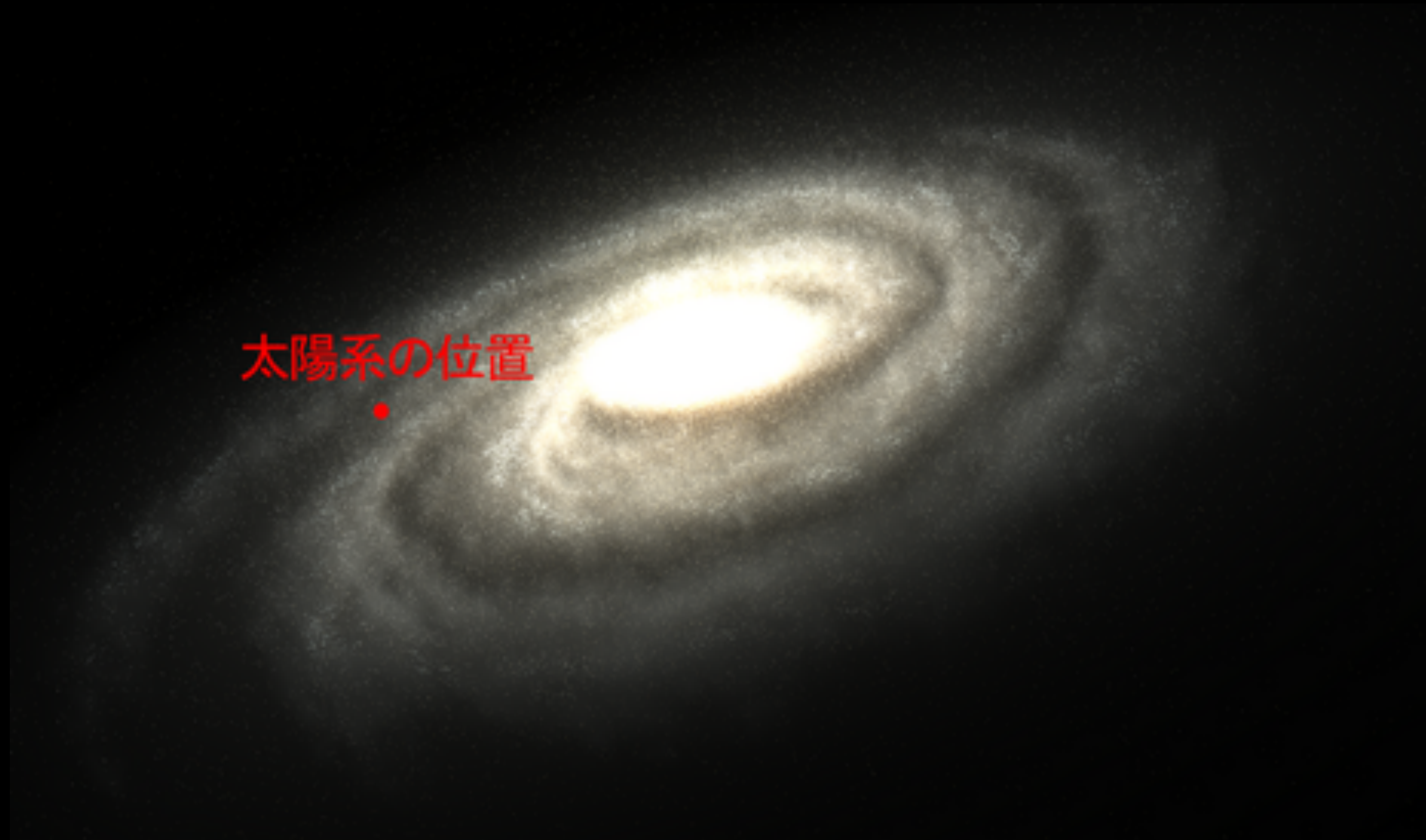
想像図

銀河中心からジェットが吹き出す
(活動銀河核 active galactic nuclei)
すべてのガスが吸い込まれるわけではない
軸方向にジェットが吹き出す



「明るい天体」 = ブラックホール

天の川銀河



出典 天文学辞典(日本天文学会) HP

はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座



銀河中心



さそり座

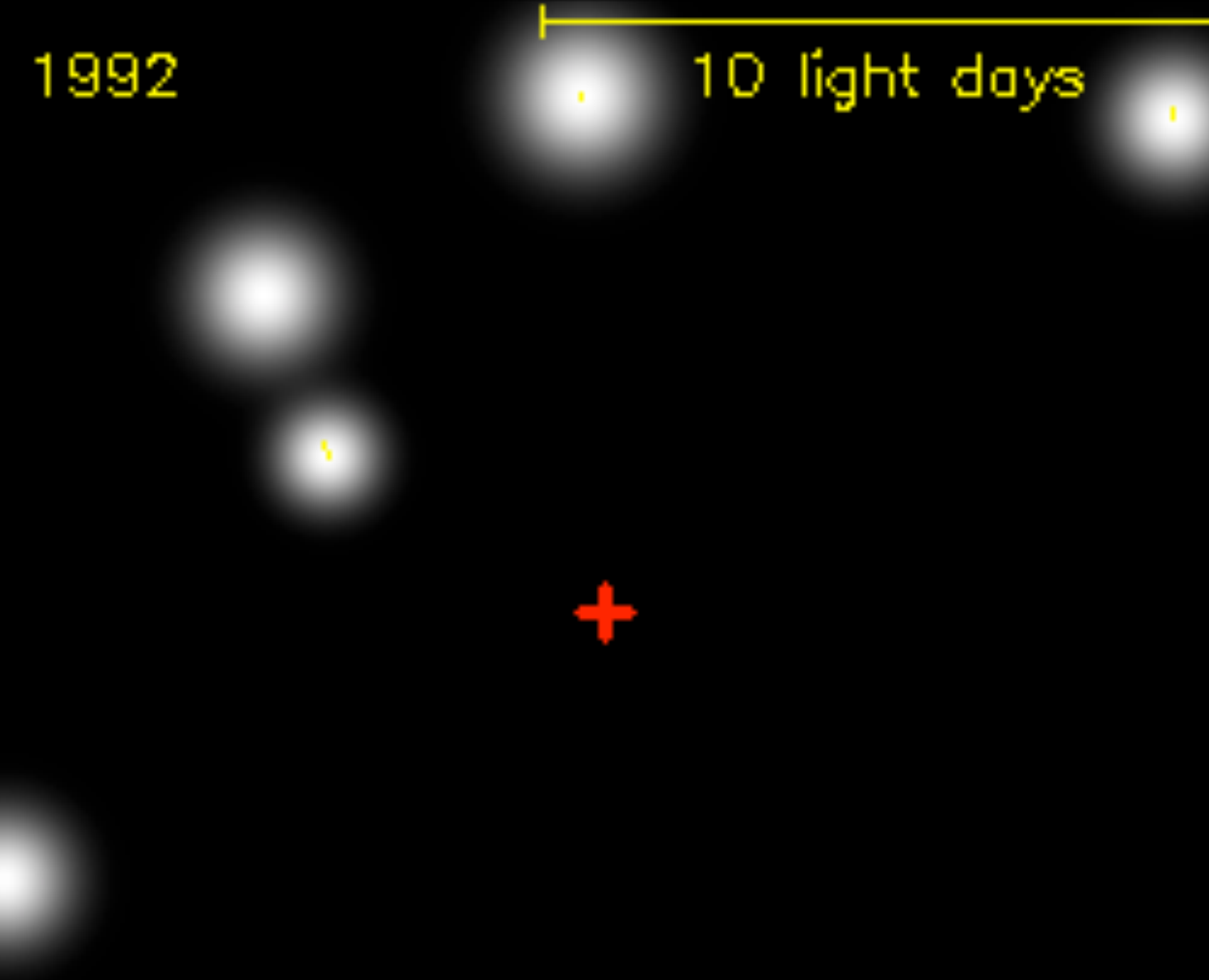
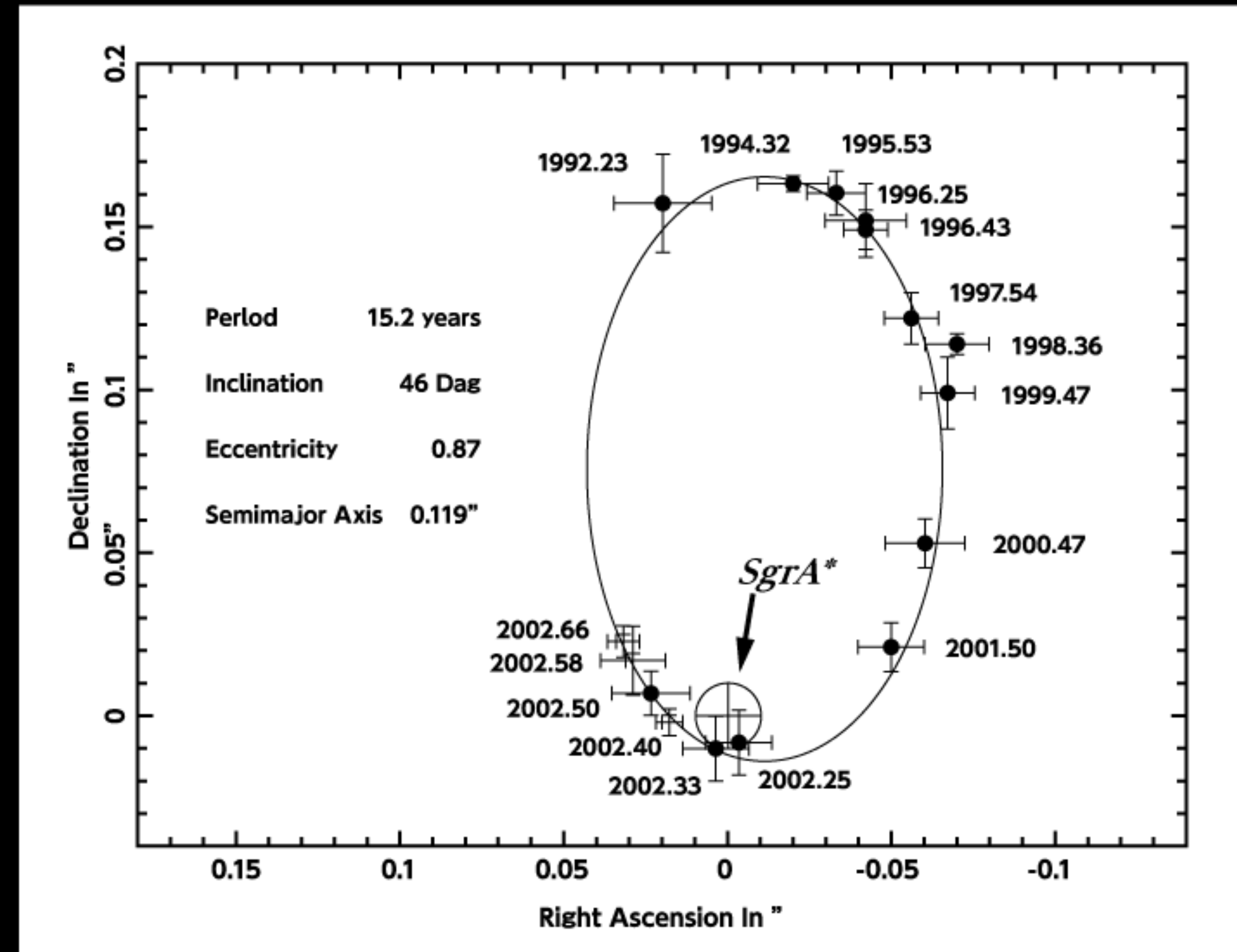




Zooming in on the centre of the Milky Way

<http://www.youtube.com/watch?v=XhHUNvEKUY8> (1:15)

天の川銀河の中心には巨大ブラックホールがある(太陽質量の400万倍)



2020年 ノーベル物理学賞受賞

ロジャー・ペンローズ

「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

ラインハルト・ゲンツェル

アンドレア・ゲズ

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに對して」

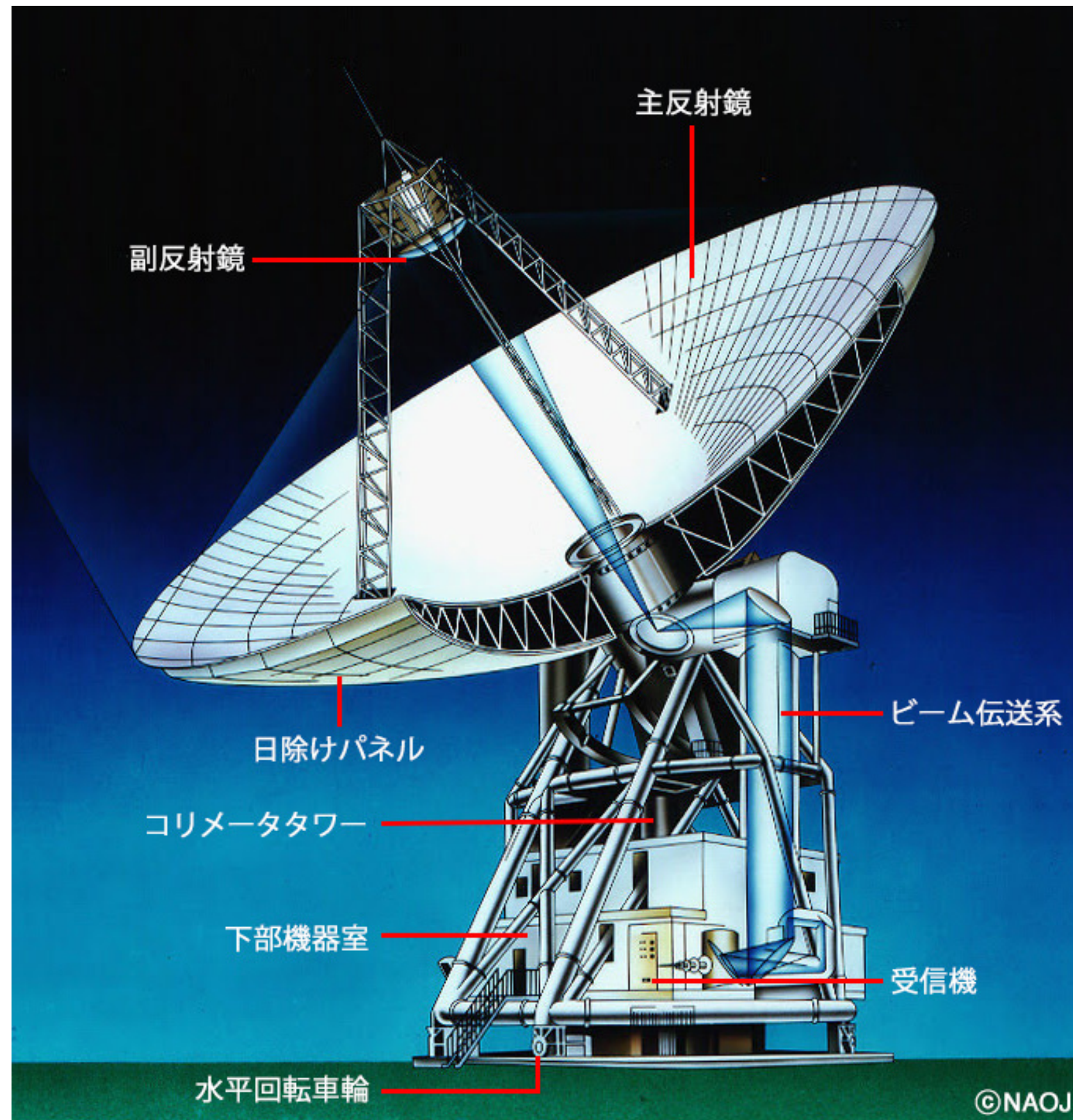
2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



地球から5500万光年

<https://alma-telescope.jp/news/press/eht-201904>

電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い, 分解能高い

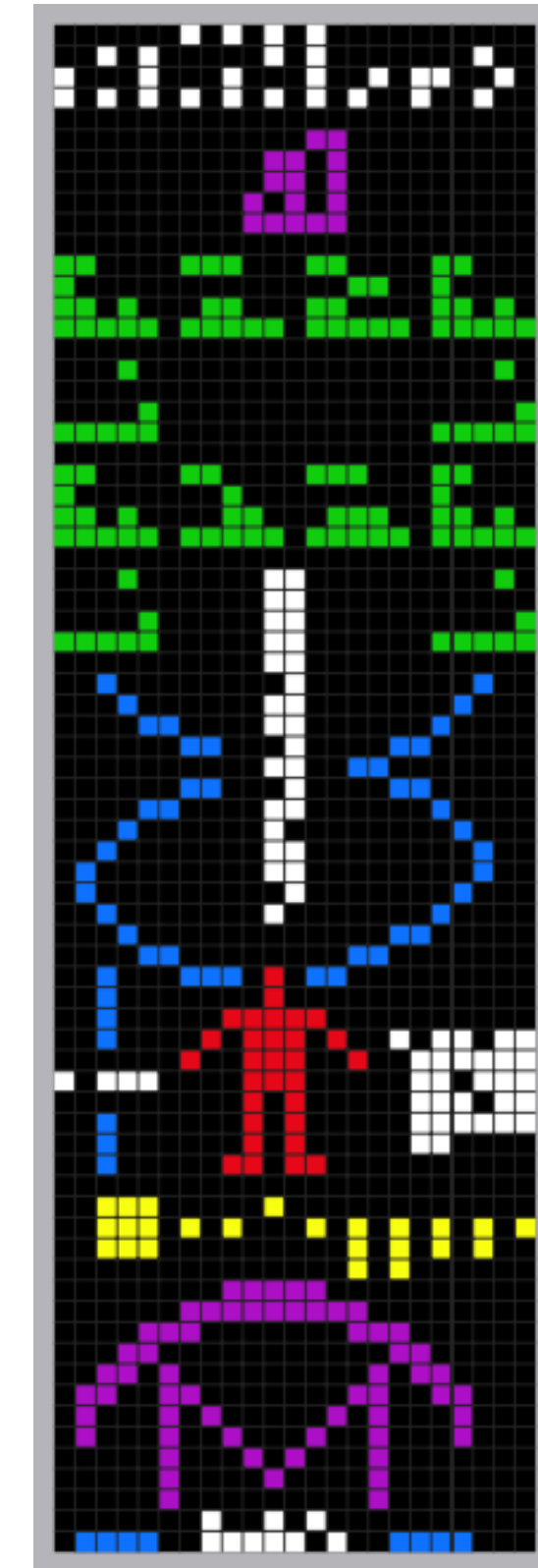


$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

野辺山45m望遠鏡

アレシボ電波望遠鏡 305メートル球面電波望遠鏡(1963ー2020)

(Arecibo Observatory, プエルトリコ)



- 1964 水星の自転周期55日の発見
- 1968 かにパルサー中心に中性子星発見
- 1974 連星中性子星発見
- 1989 小惑星カスタリア直接観測
- 1992 パルサーを公転する太陽系外惑星発見

アレシボ・メッセージ (1974)
SETI (1999ー)

アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

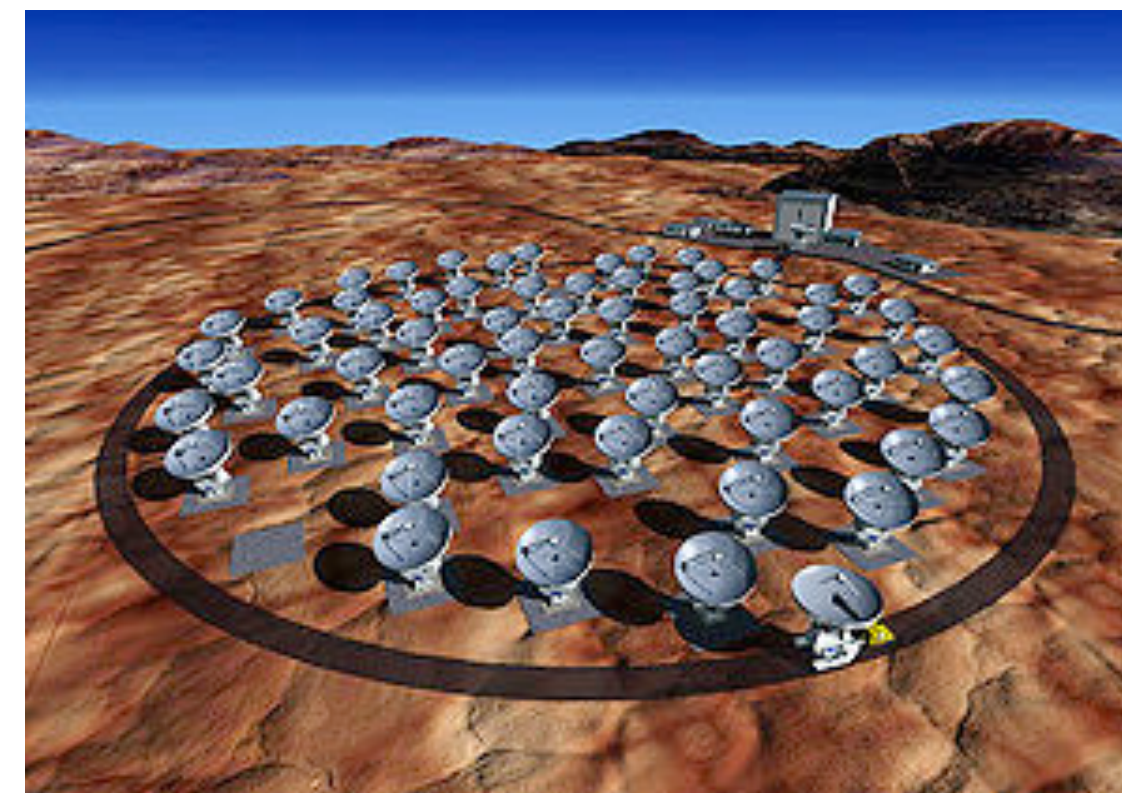
全66台のアンテナが設置され、日本は16台を担当。「いざよい」と命名。
標高5000m地点に設置されている。

直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる。最大18.5キロメートルまでアンテナ間隔を広げることができ、最大の空間分解能は、0.05 マイクロラジアン。



<http://alma.mtk.nao.ac.jp/>

「大阪にある一円玉を東京から見分けられるほどの高い解像度」



中国 天眼(FAST) 500メートル球面電波望遠鏡(2016一)

(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST)

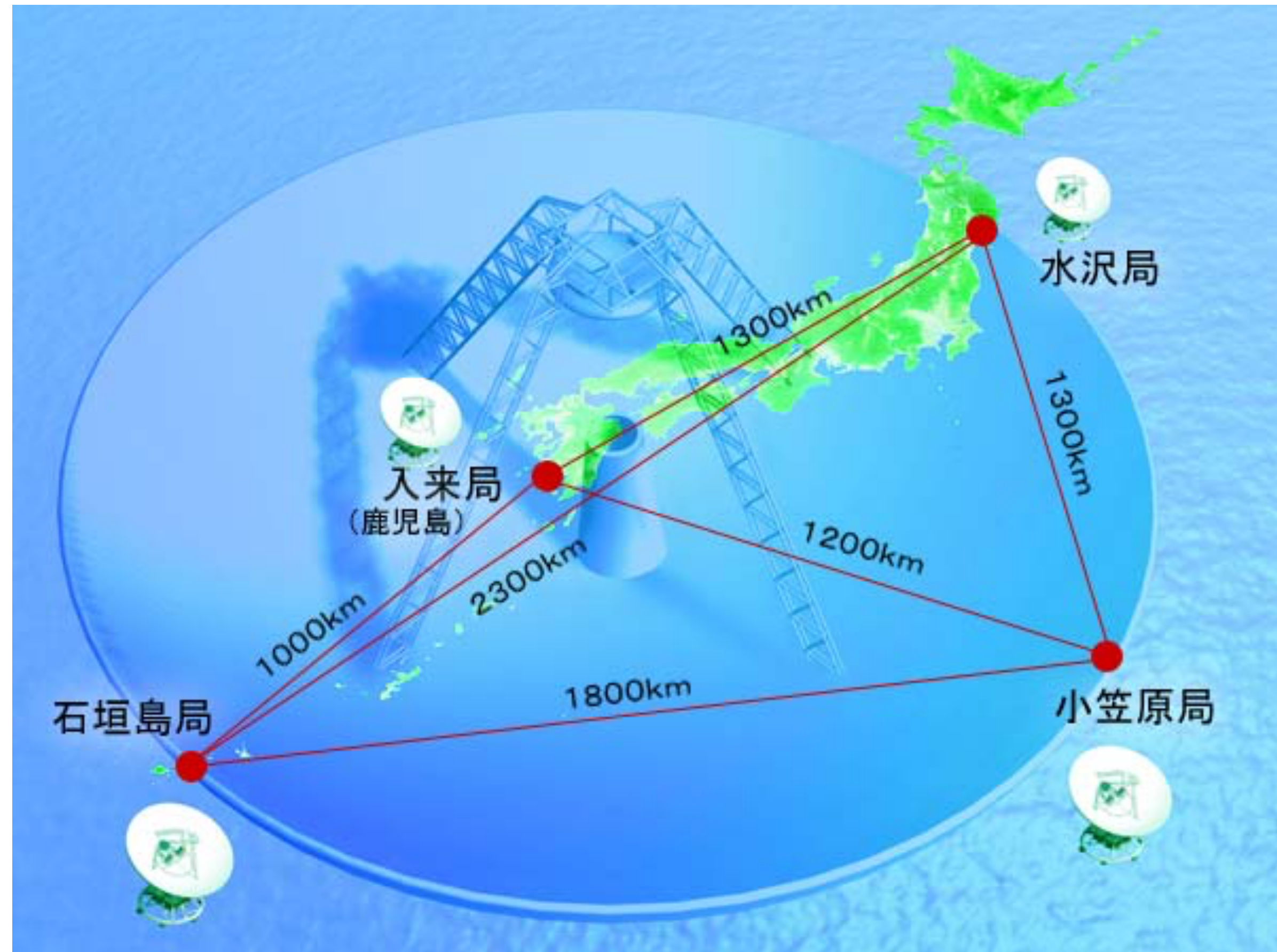


中国南西部の貴州省, 185億円, 天頂から40度の範囲を観測可能,
1万人強制移住, 半径5km以内携帯電話禁止

電波干渉計



VLBI = Very Long Baseline Interferometer
VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html>

Event Horizon Telescope



ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像



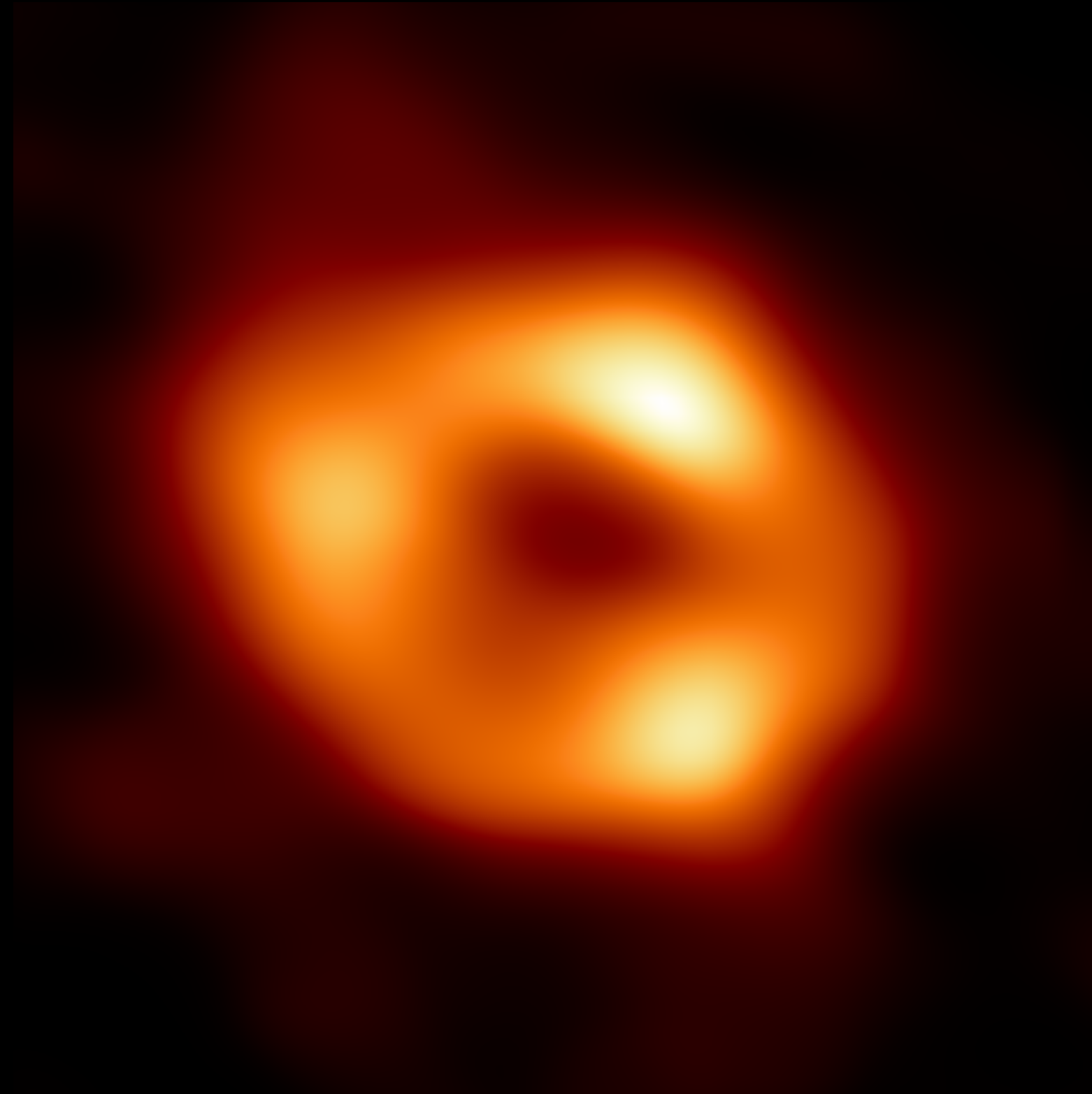
2019年4月10日 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



M87銀河（地球から5500万光年, 太陽質量の65億倍）

出典 Event Horizon Telescope HP

2022年5月22日 国立天文台グループ「天の川ブラックホールの撮像に成功」



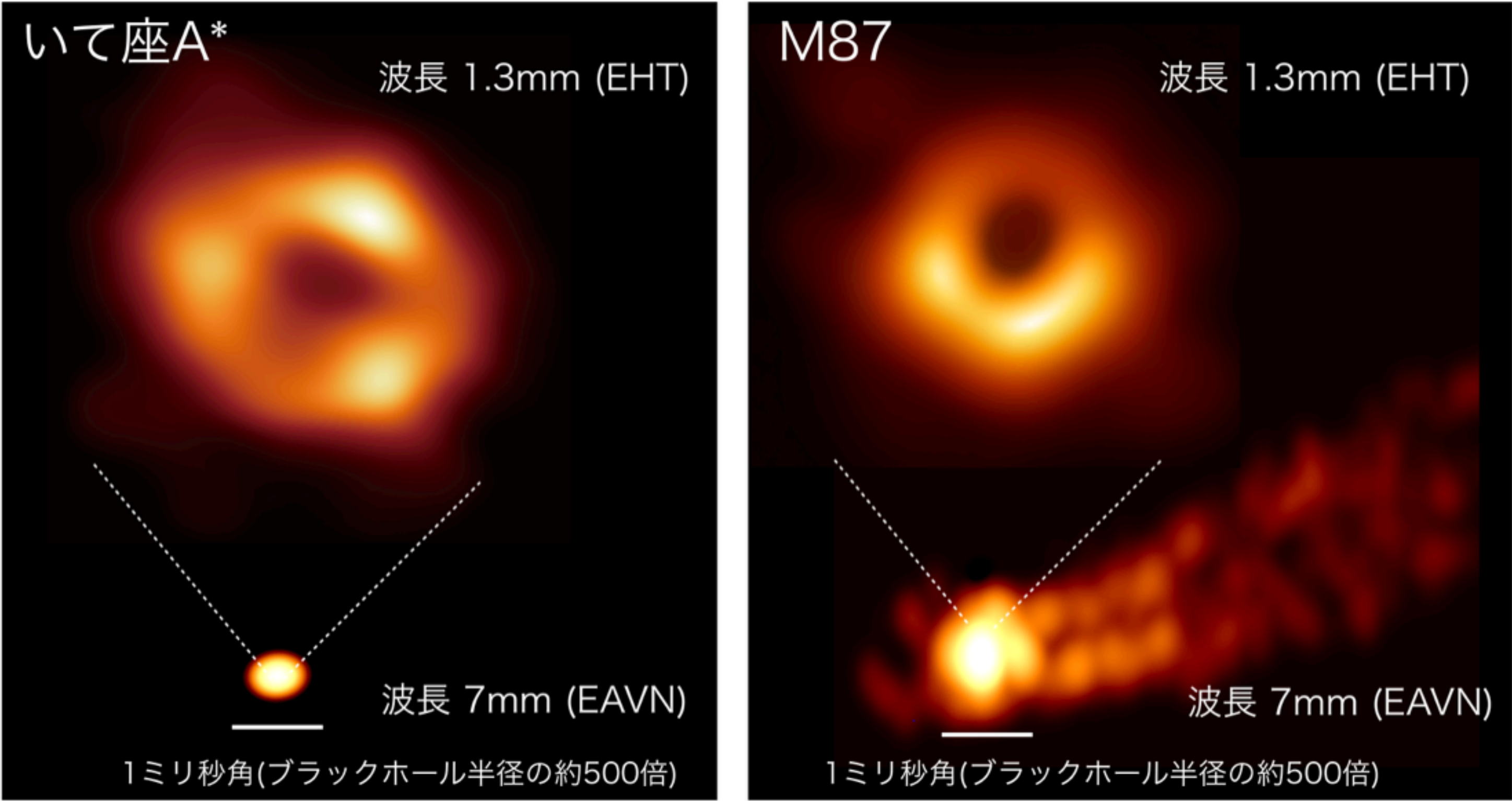
天の川銀河中心（地球から3万光年, 太陽質量の400万倍）

出典 Event Horizon Telescope HP

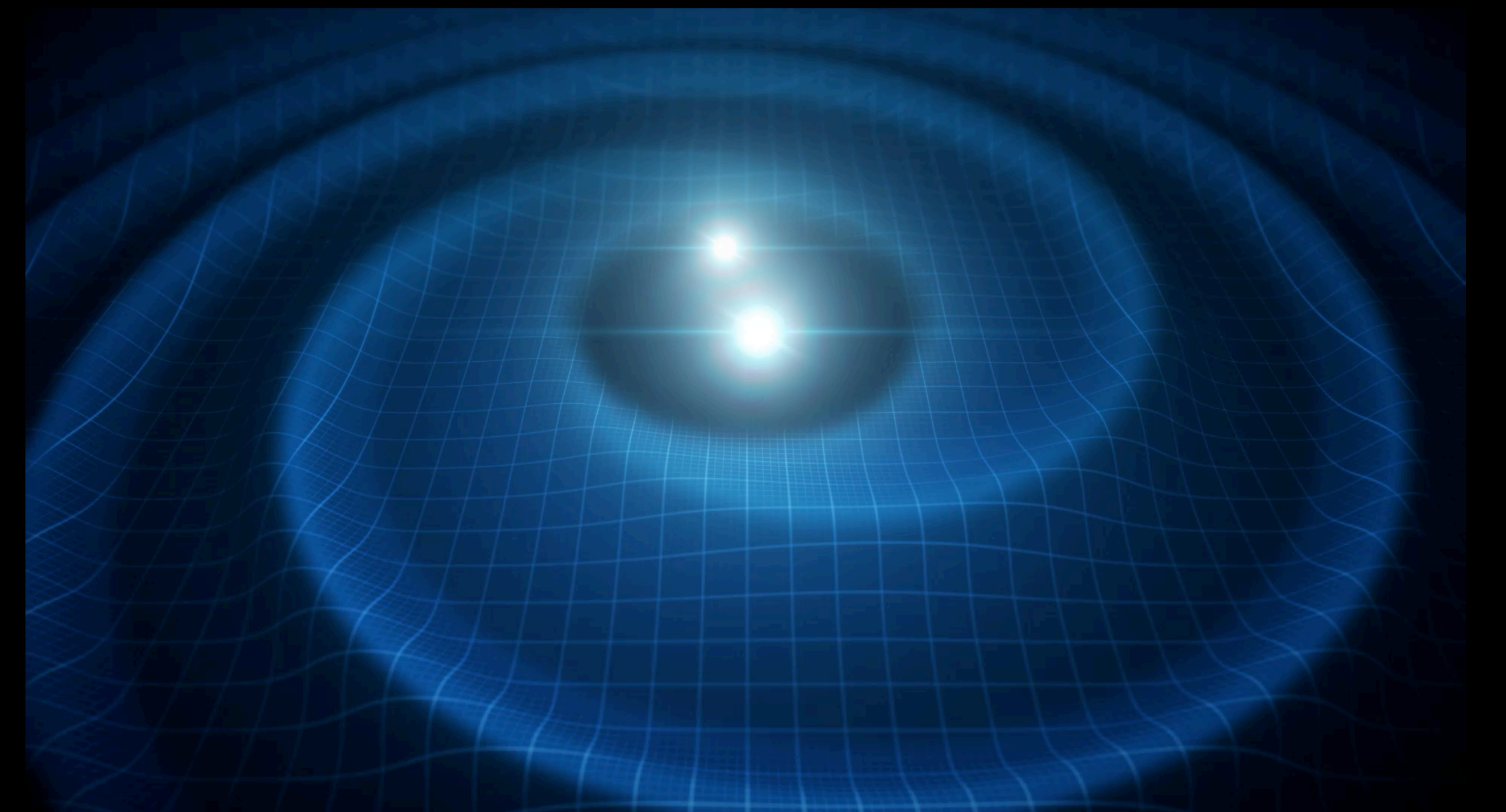
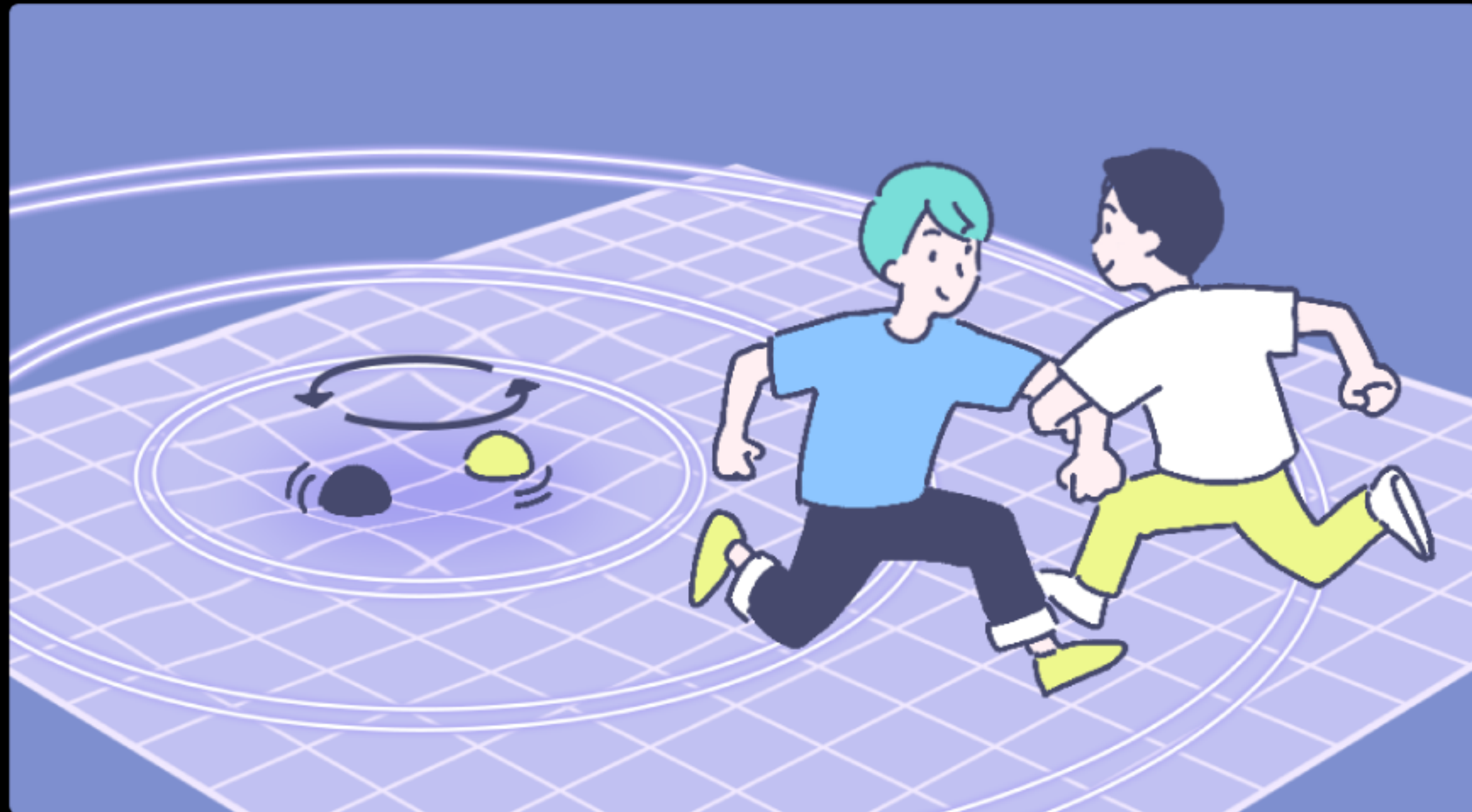
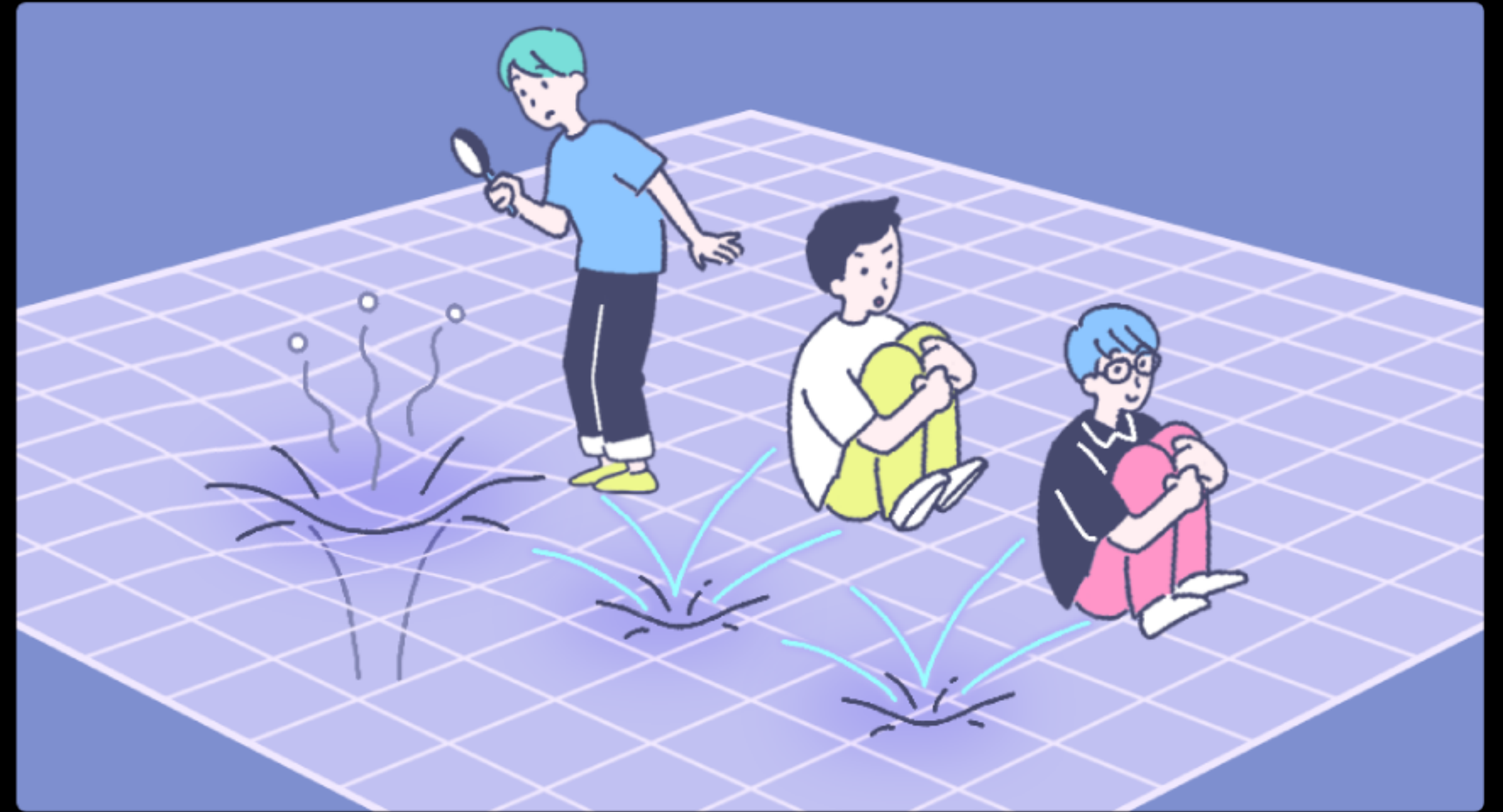
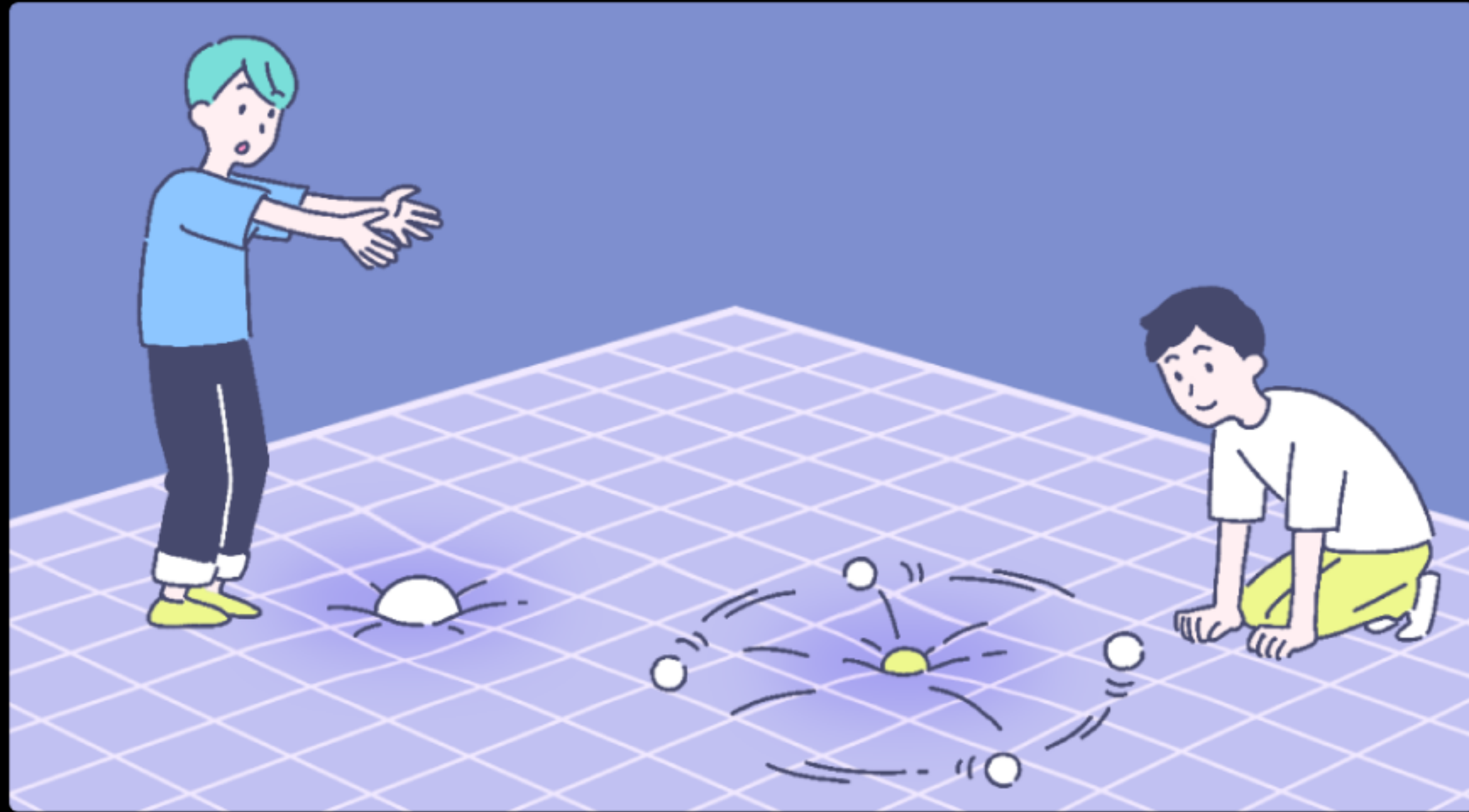
2022年5月12日,「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

Sgr A*	M87
400万太陽質量	65億太陽質量
8 kpc	16.8 Mpc

3桁大きなBHが
3桁遠くにいるので、
同じ位の大きさに見える

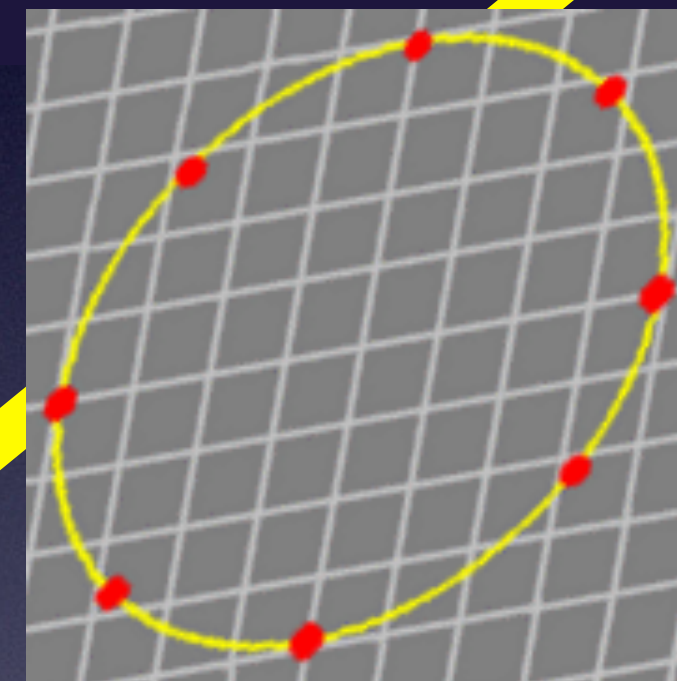
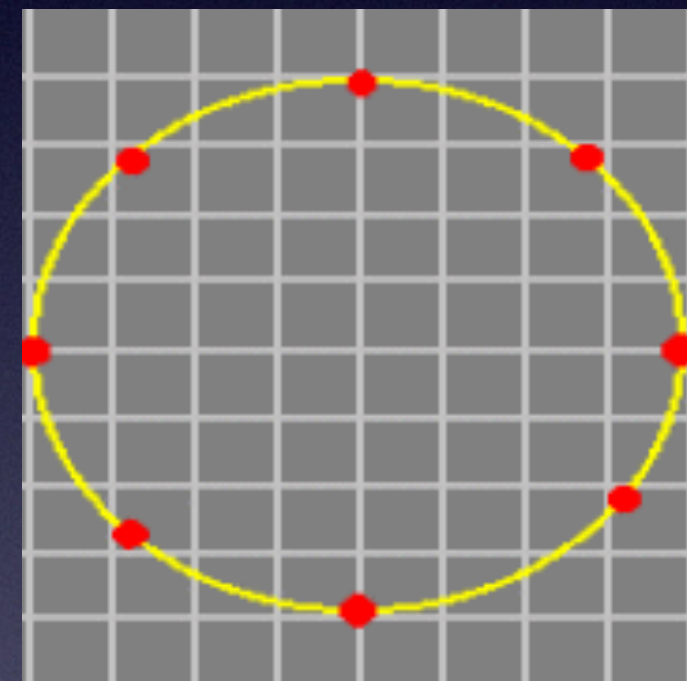
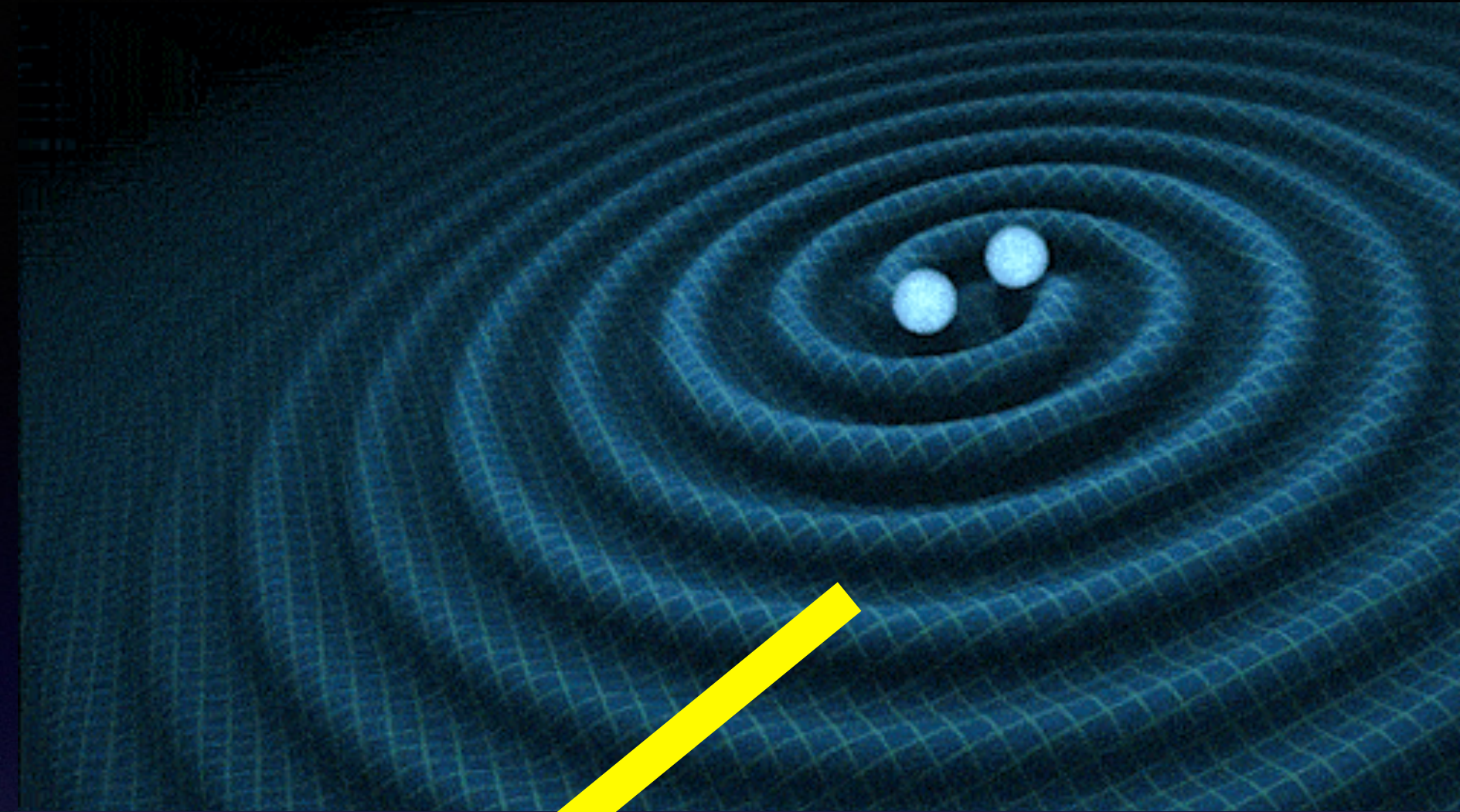


[図6] いて座A*（左）とM87（右）の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網（EAVN）で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。（クレジット：EHT Collaboration, EAVN Collaboration）



重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



レーザー干渉計

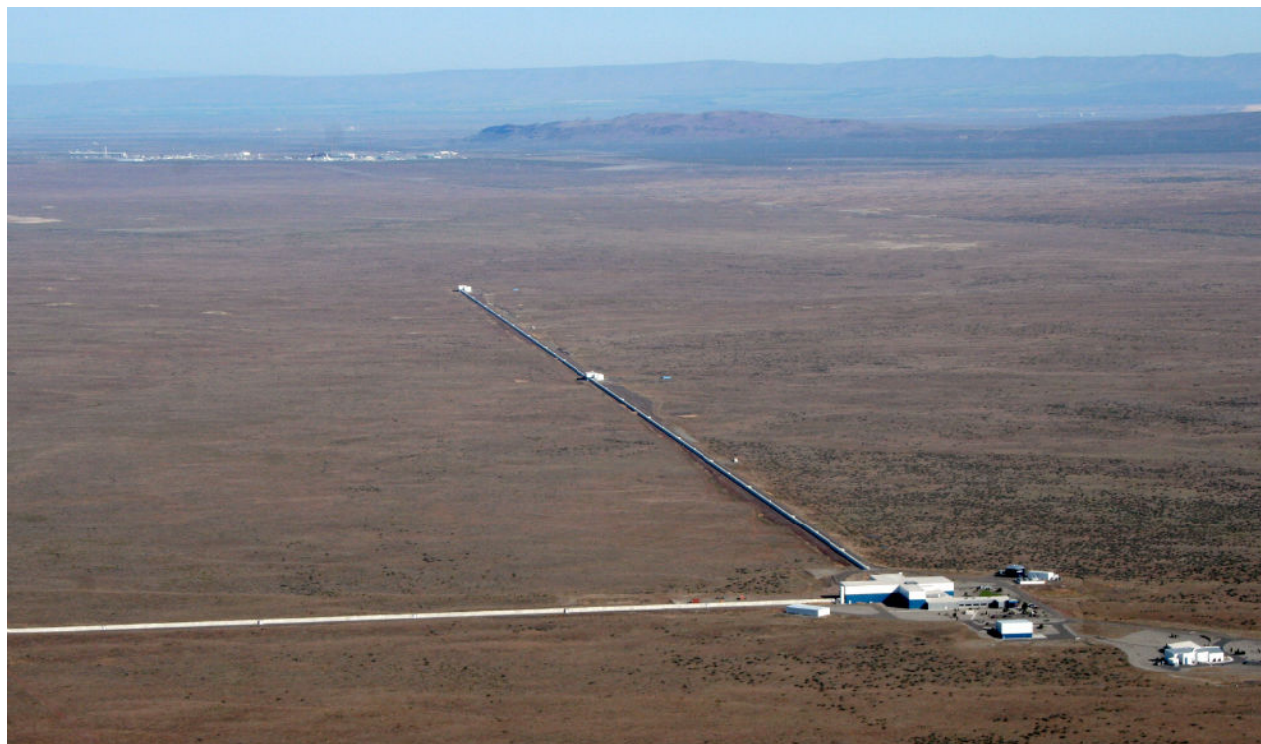
LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

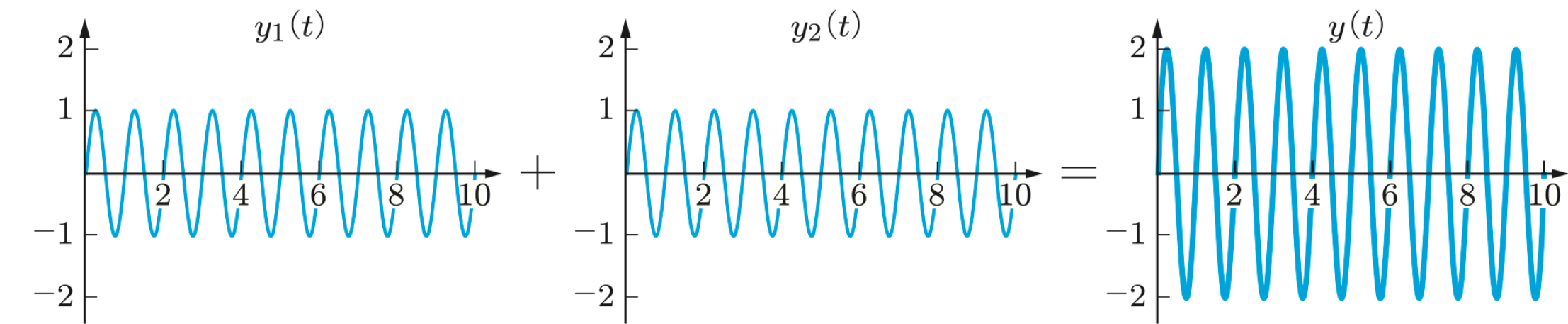
レーザー干渉計のしくみ： 干渉とは

干渉＝波が重なって強めあったり弱めあったりする現象

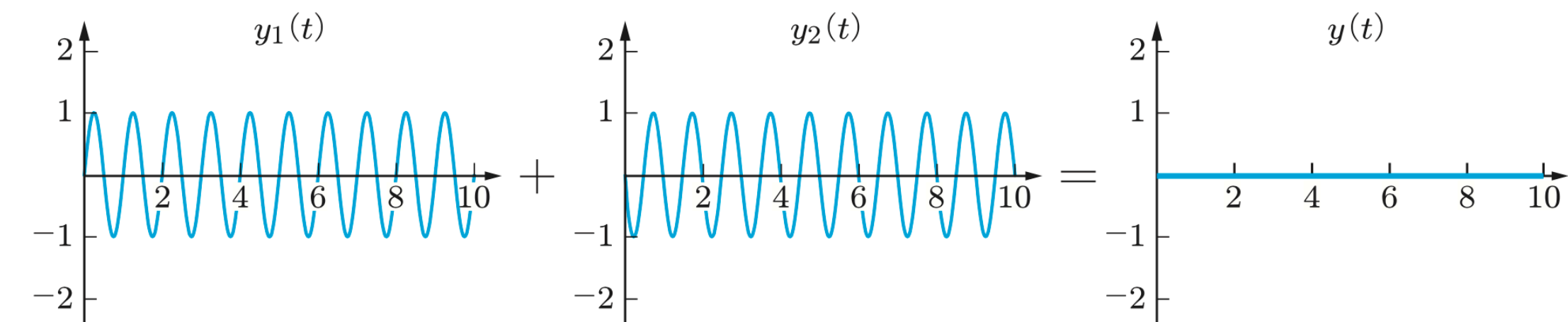
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO,らいご)



<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



山＋山＝強めあう



山＋谷＝弱めあう

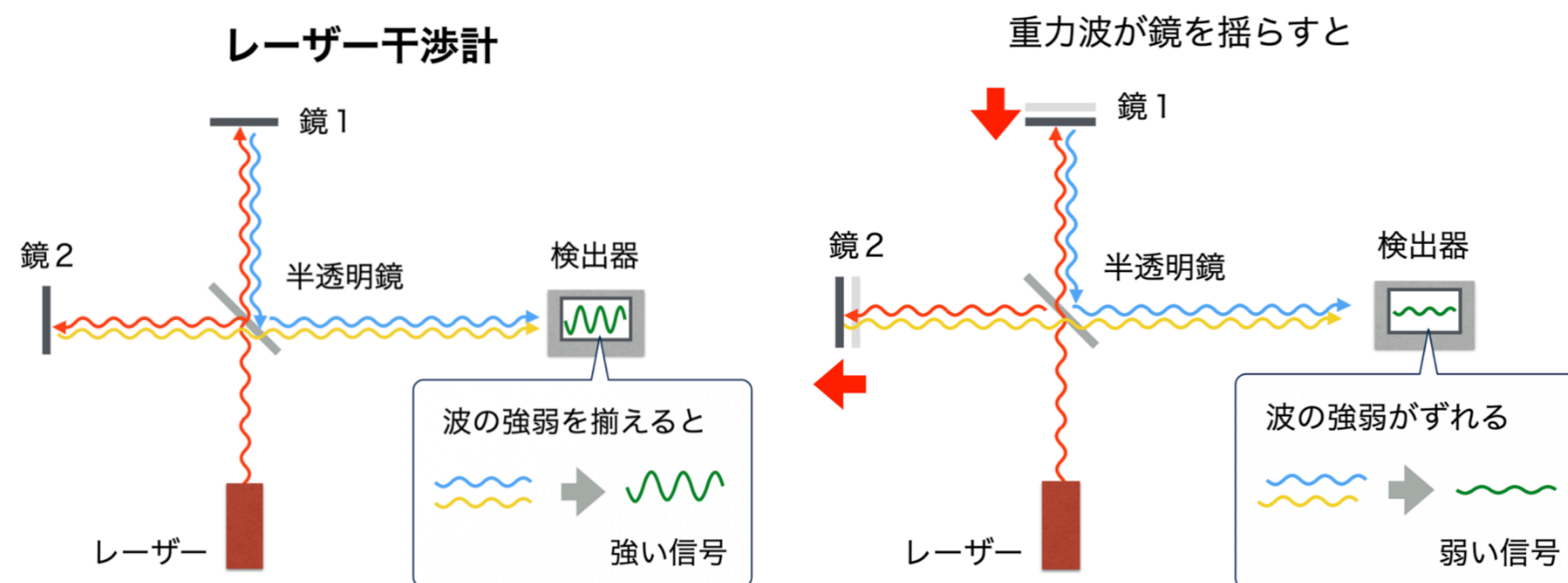
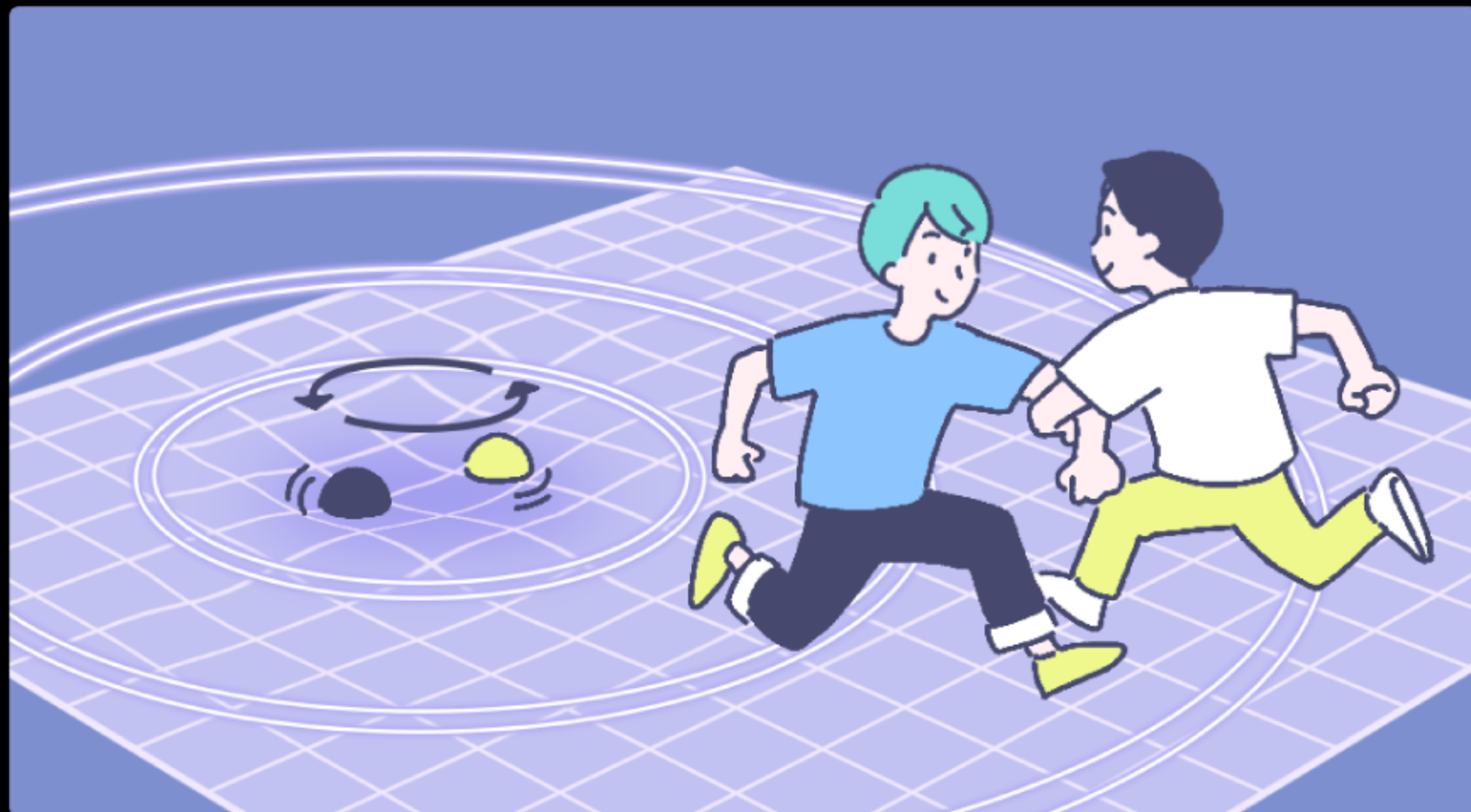
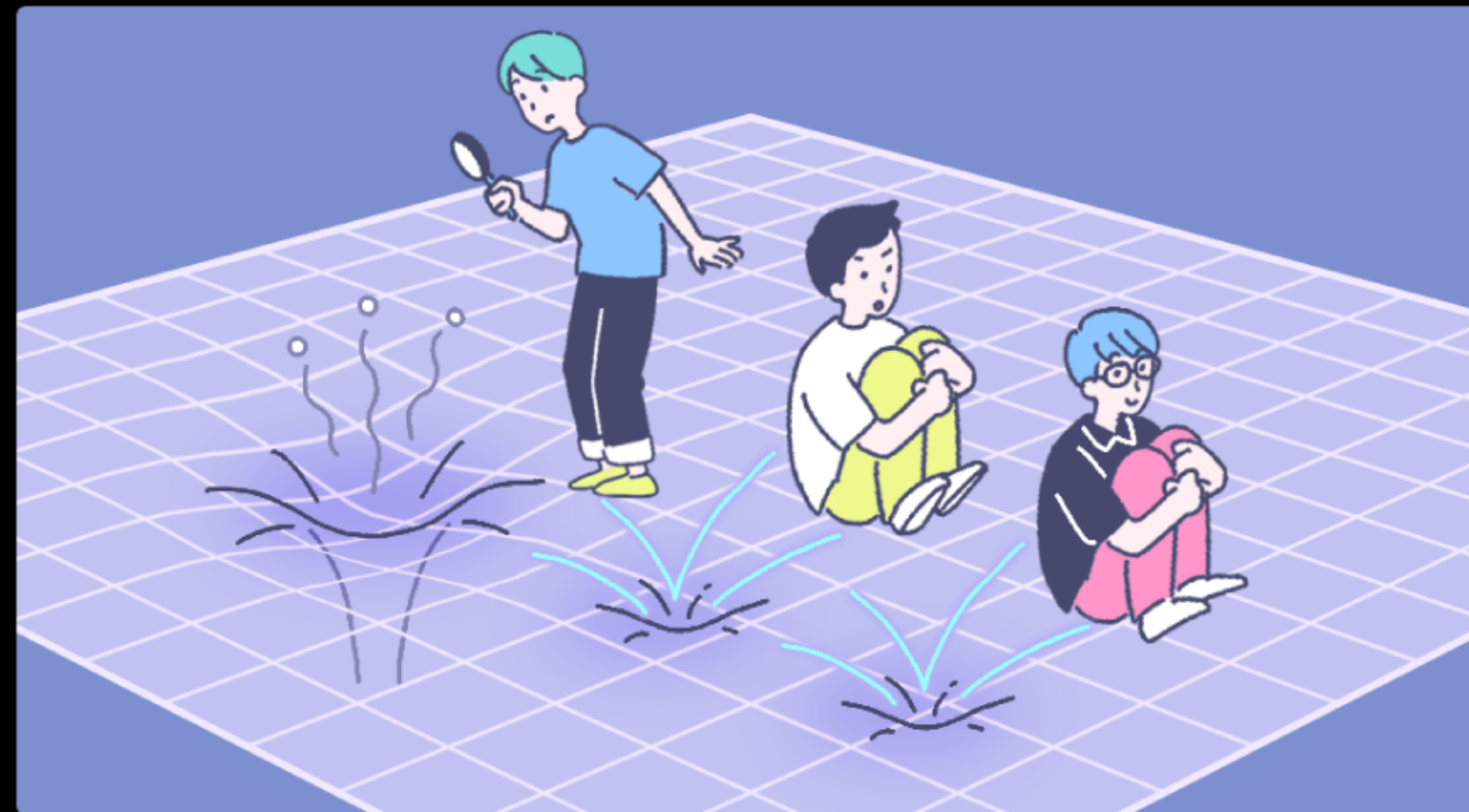
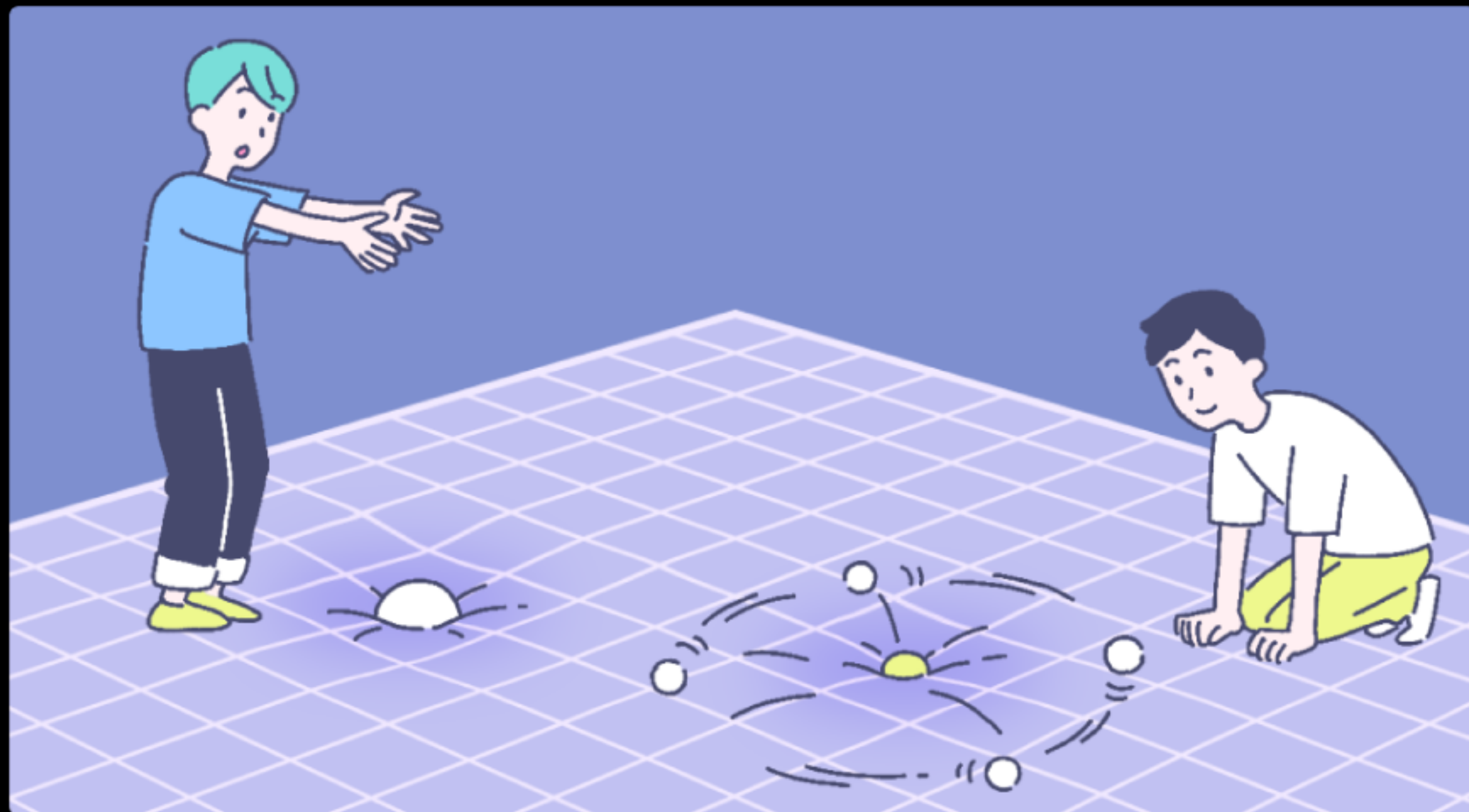


図 18 レーザー干渉計の概念図.

レーザー干渉計のしくみ

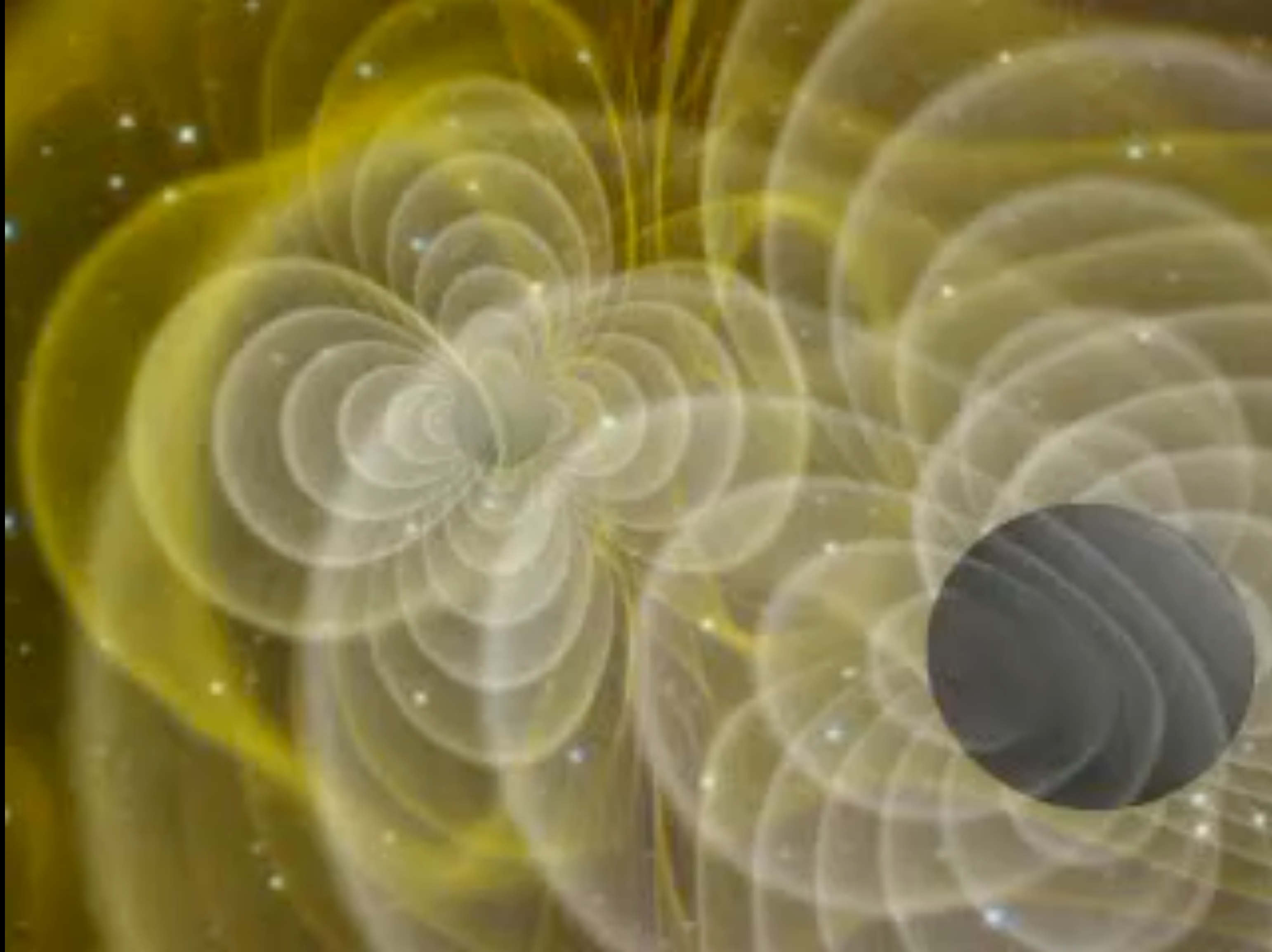
Michelson Interferometer

MIT Department of Physics
Technical Services Group



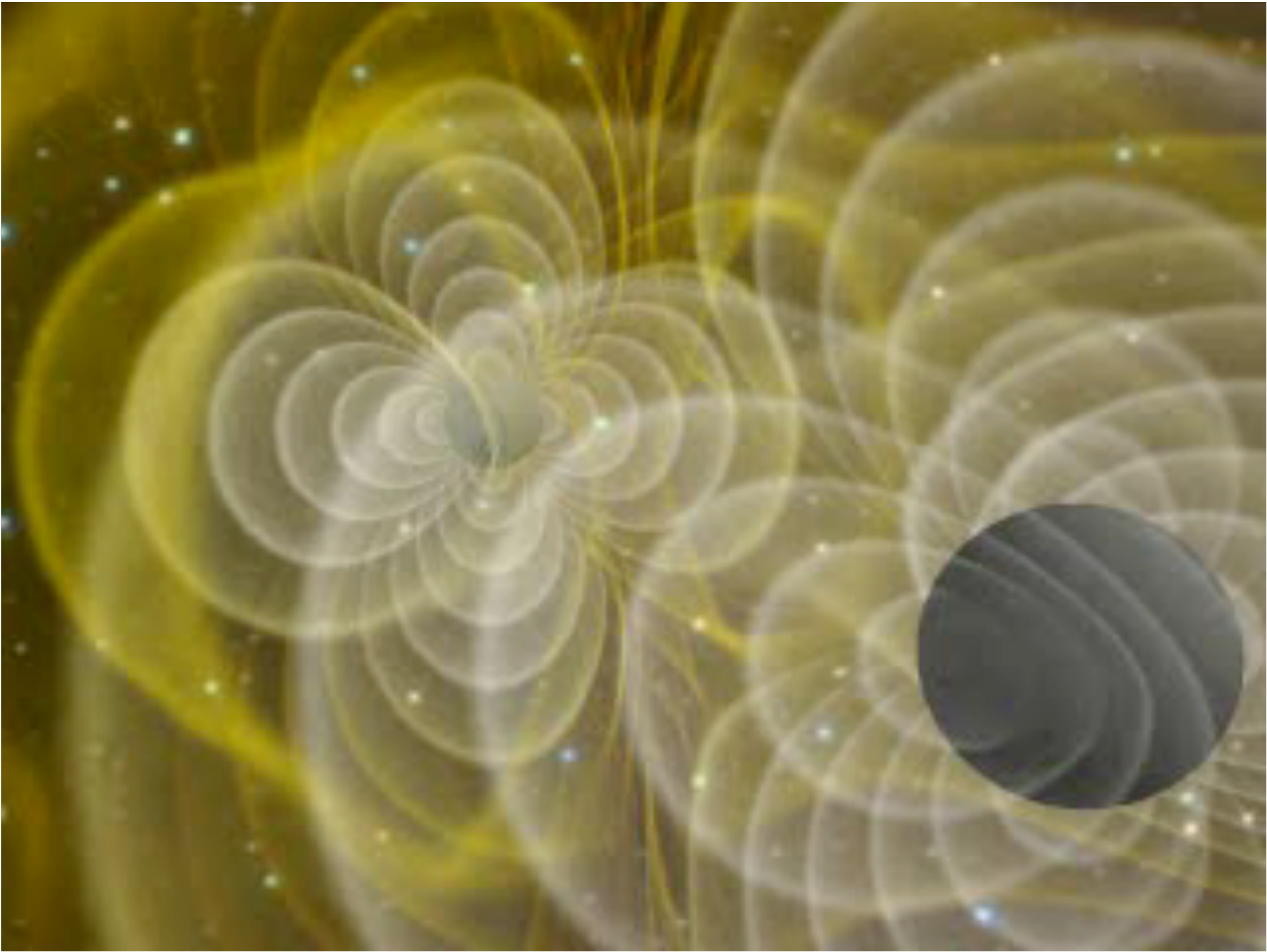


ブラックホールの合体シミュレーション

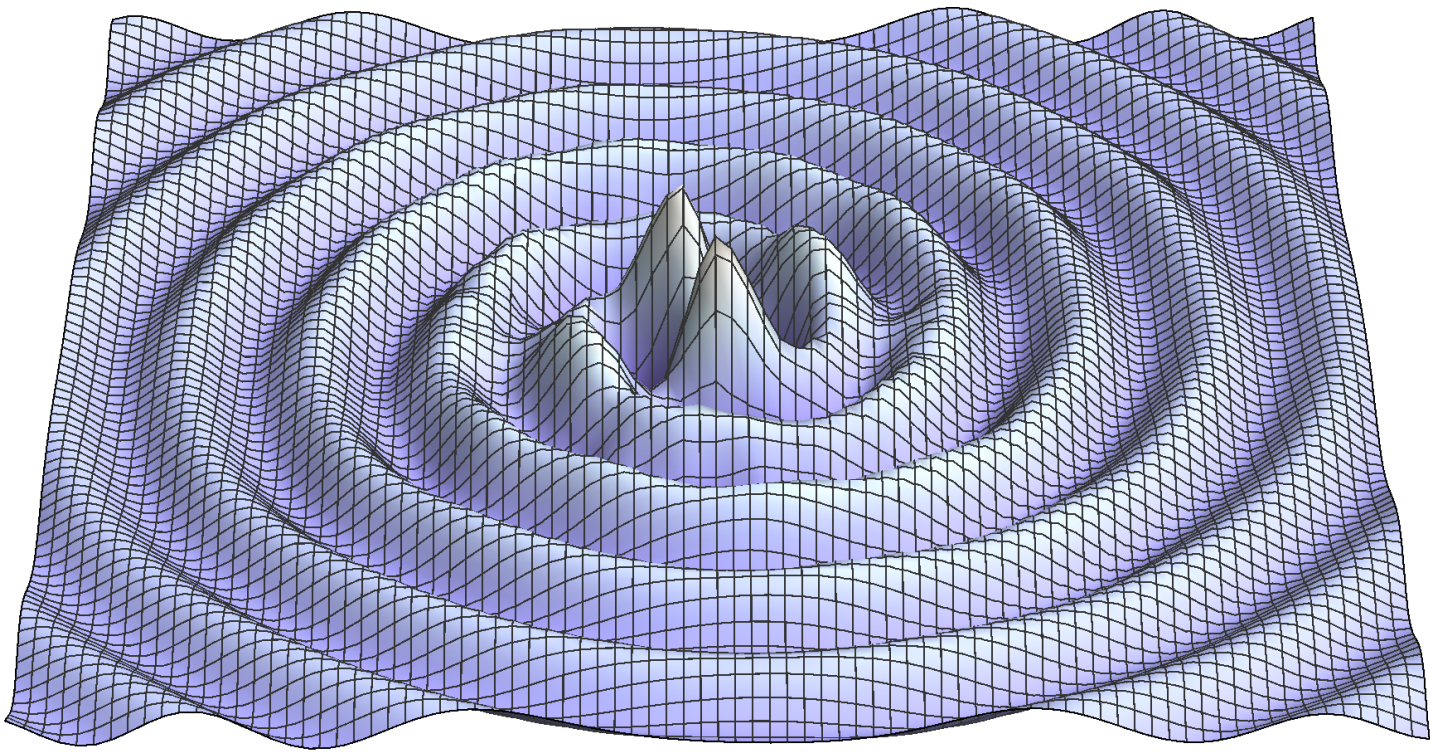


NCSA-AEI group (1998)

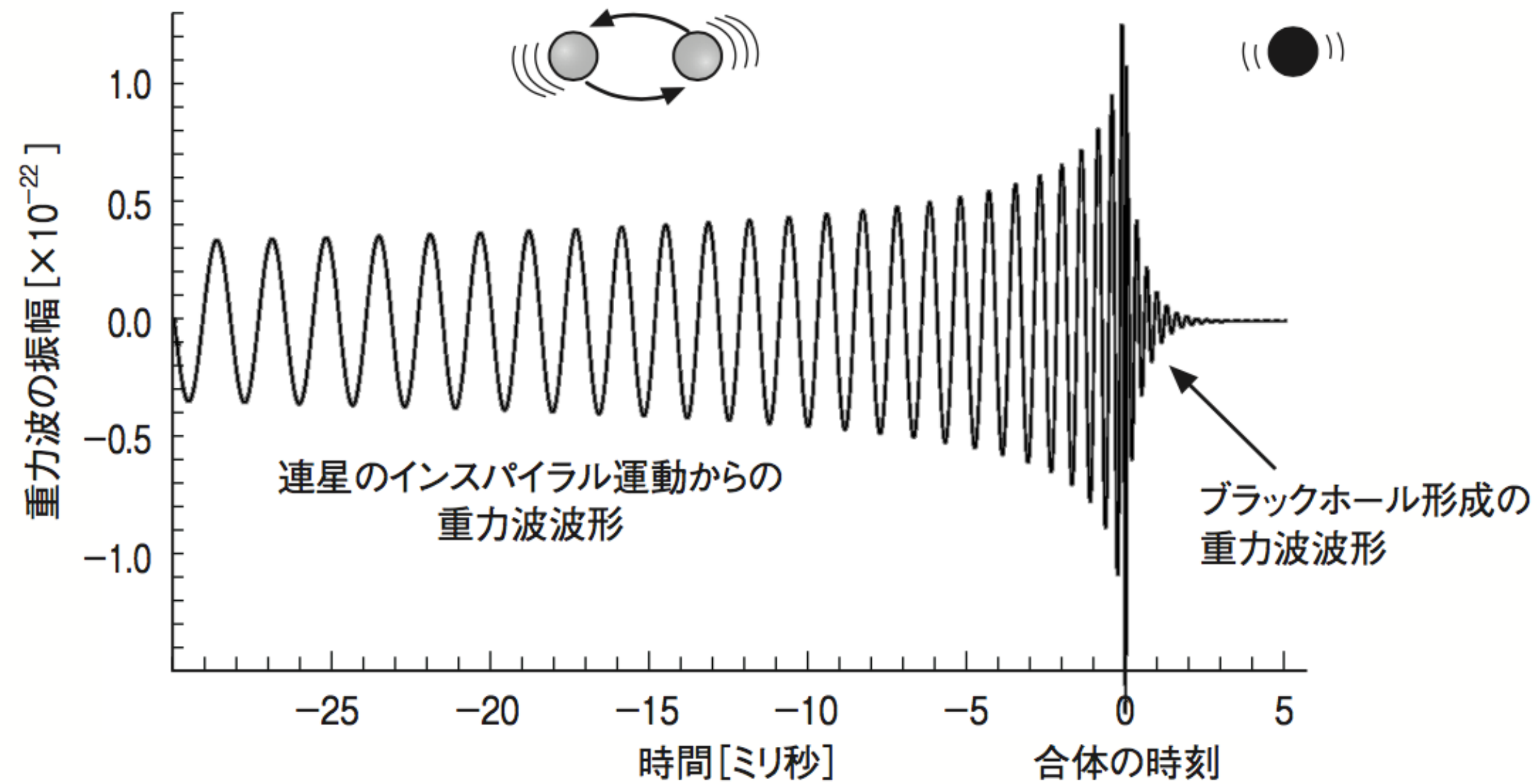
連星合体からの重力波の波形(理論予測)

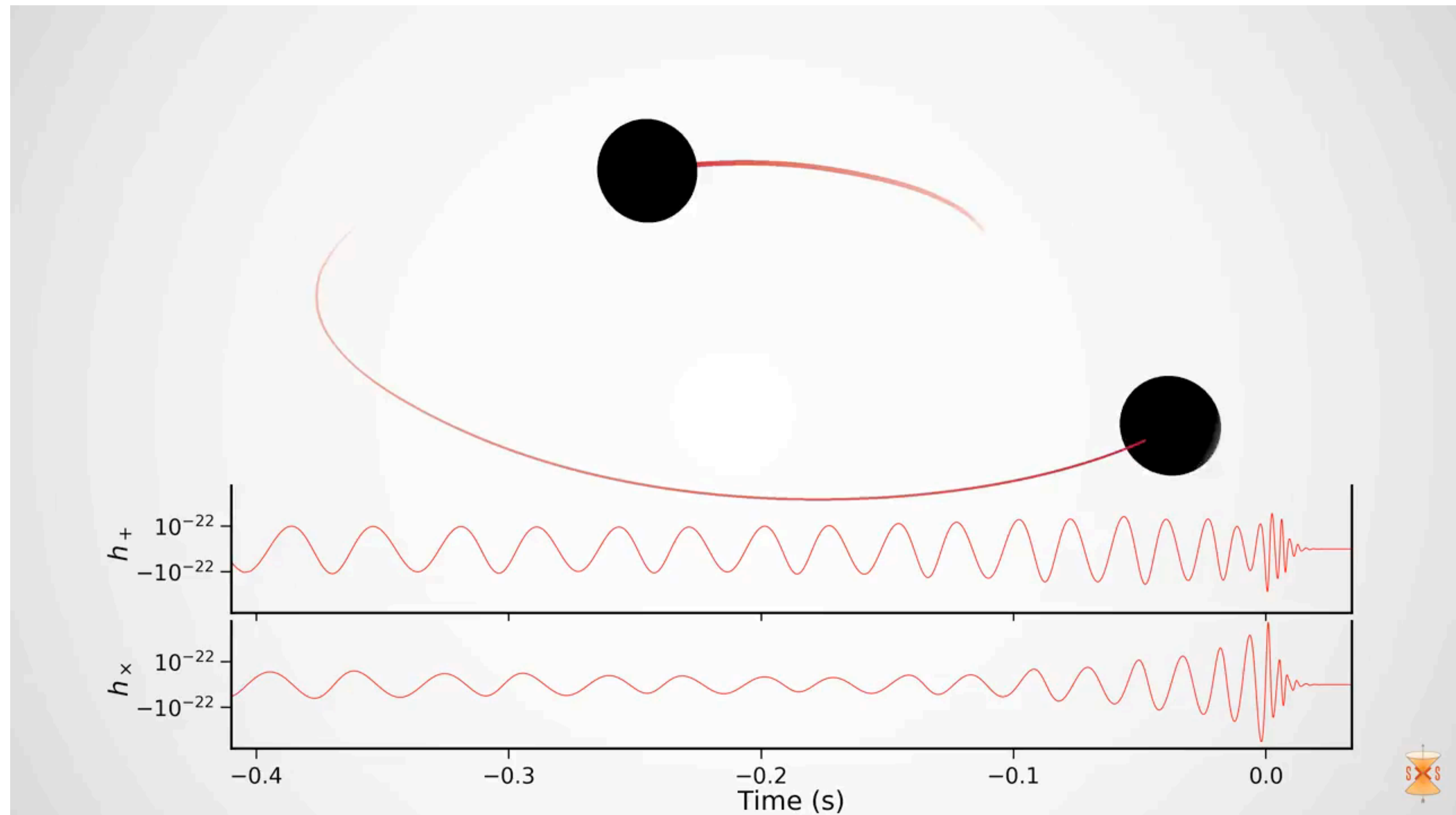


(NCSA-AEIグループ, 1998年)



Inspiral **Merger** **Ringdown**





Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown black holes are spinning, and angular momentum is exchanged among the two black holes and with the orbit. This results in a quite dramatic change in the orientation of the orbital plane, clearly visible in the movie. Furthermore, the spin-axes of the black holes change, as visible through the colored patch on each black hole horizon, which indicates the north pole.

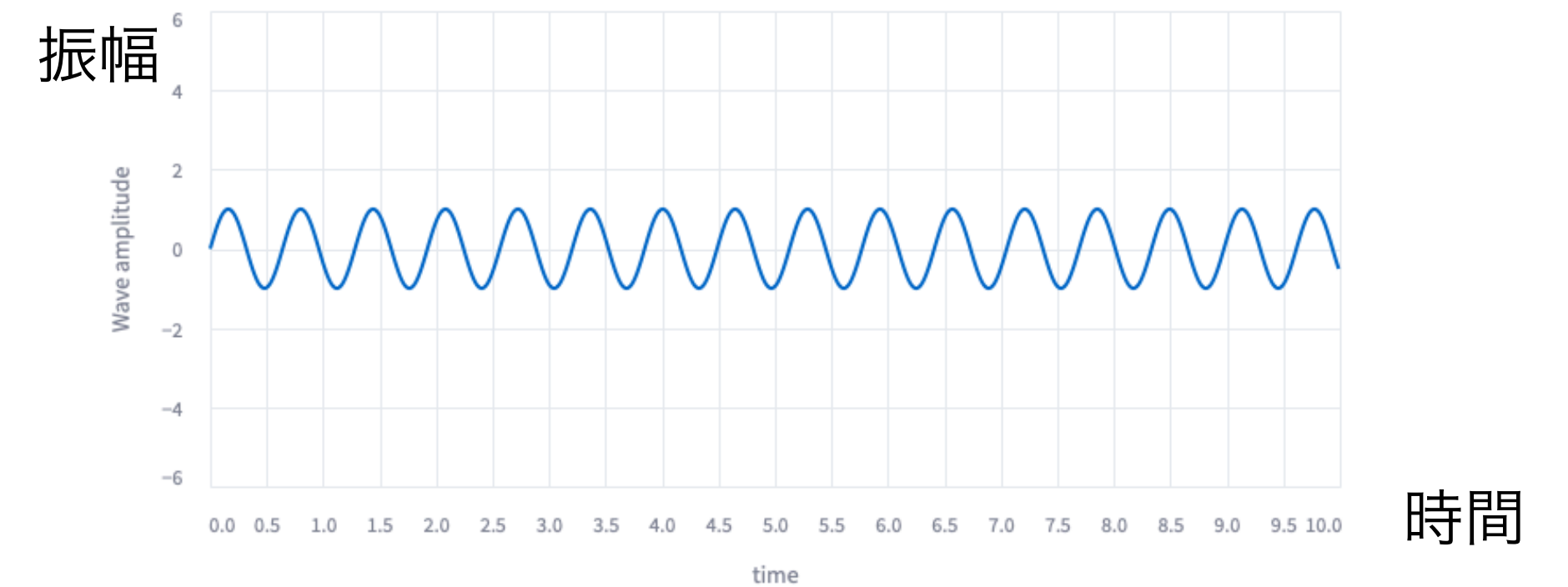
The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation of the orbital plane and its change during the inspiral. Presently, LIGO can only measure one of the polarizations and therefore obtains only limited information about the orientation of the binary. This disadvantage will be remedied with the advent of additional gravitational wave detectors in Italy, Japan and India.

Finally, the slowed-down replay of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the distortion of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is "kicked" by the emitted gravitational waves, and moves upward. (Credit: A. Babul/H. Pfeiffer/CITA/SXS.) - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf>

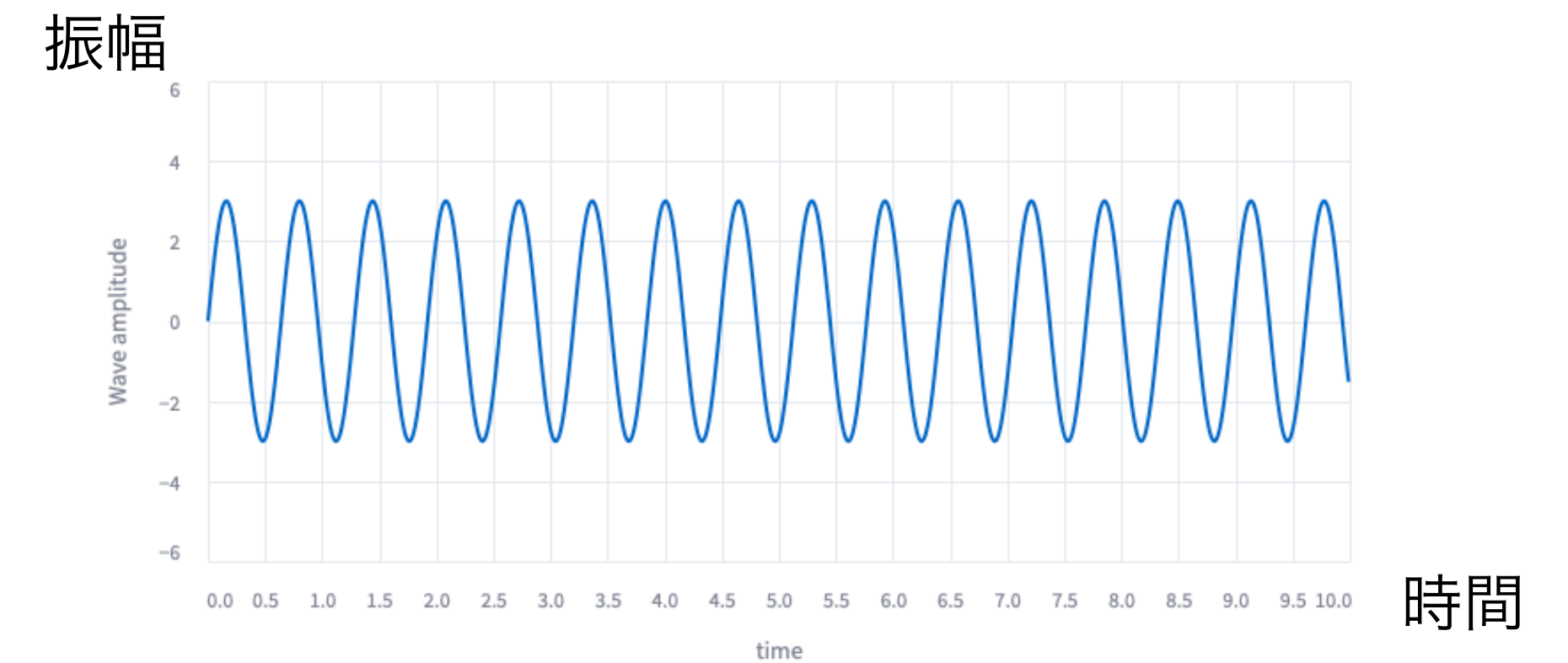
波の振幅

波の**振幅**を変えると
音の大きさが変わるよ.

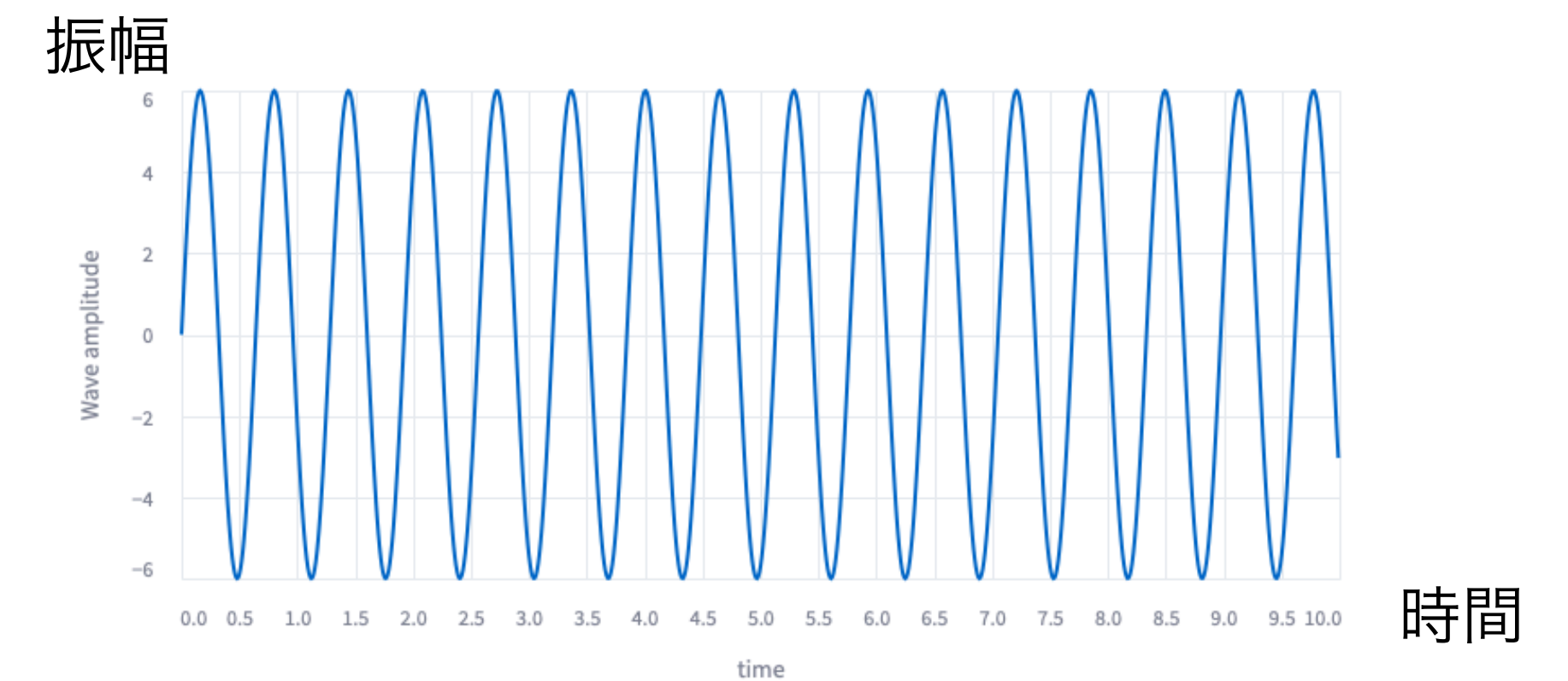
この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶



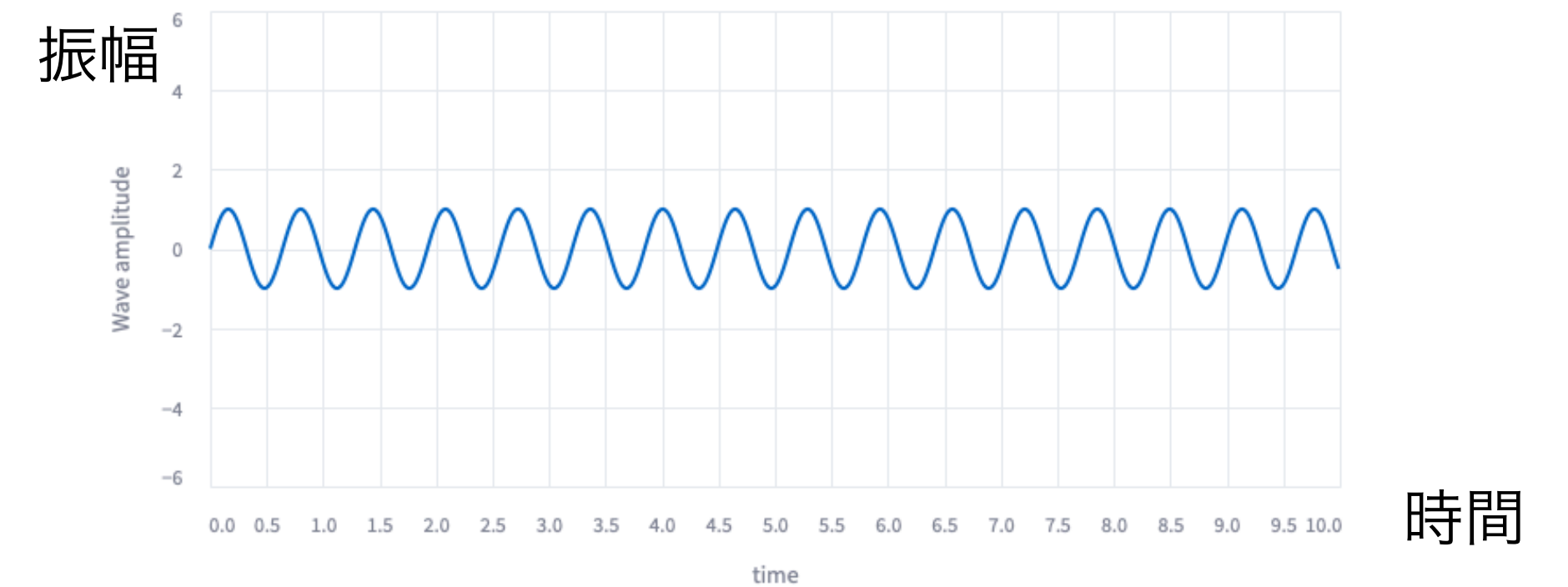
クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.

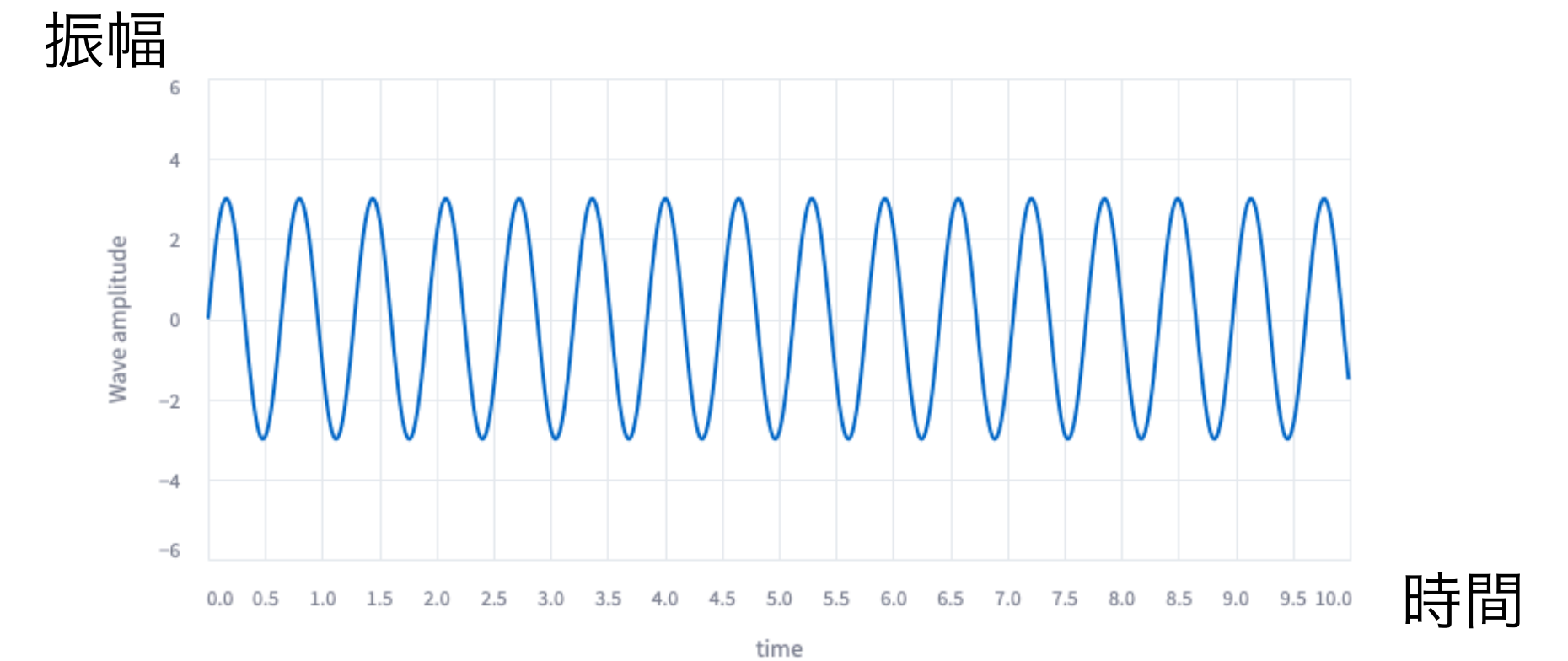
波の振幅

波の**振幅**を変えると
音の大きさが変わるよ.

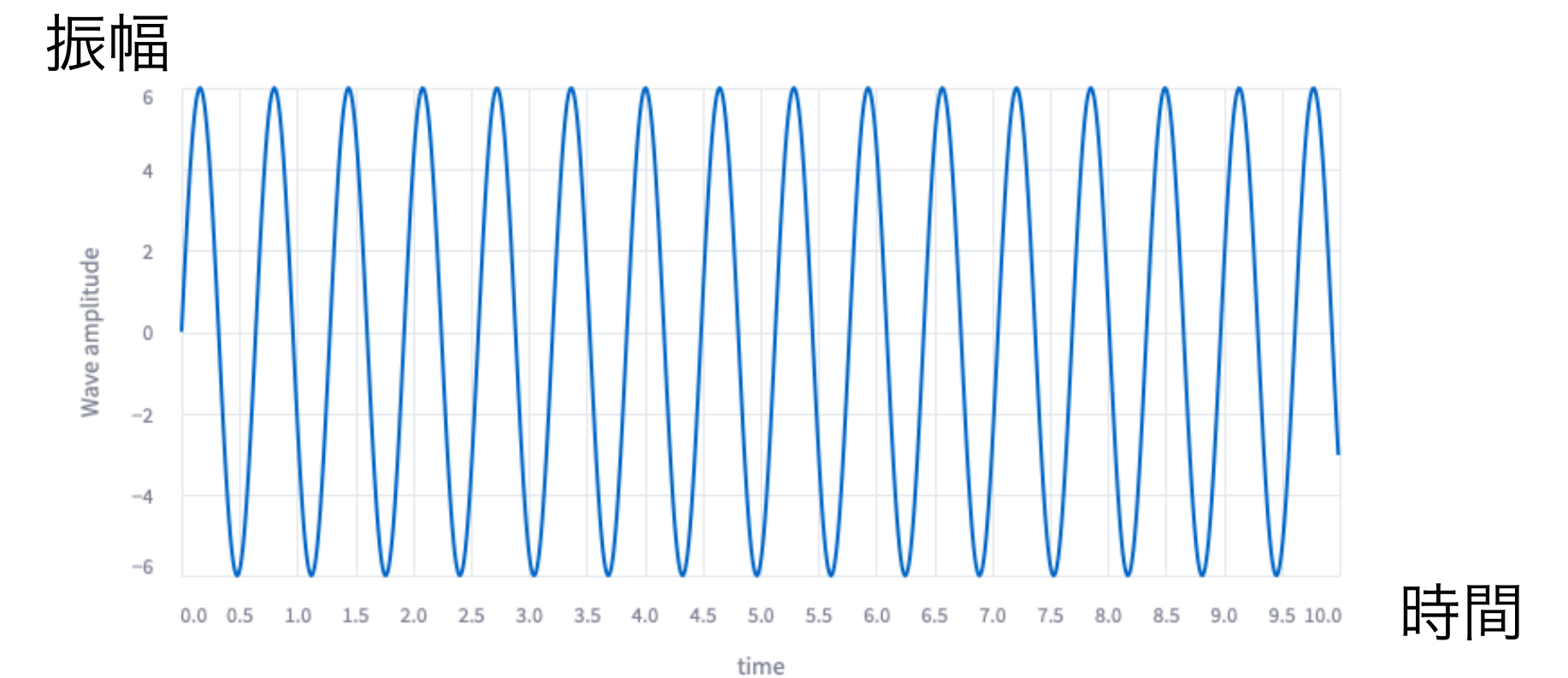
この波の音
再生中▶



この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.

波の振幅

波の**振幅**を変えると
音の**大きさ**が変わるよ.

この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音
再生中▶

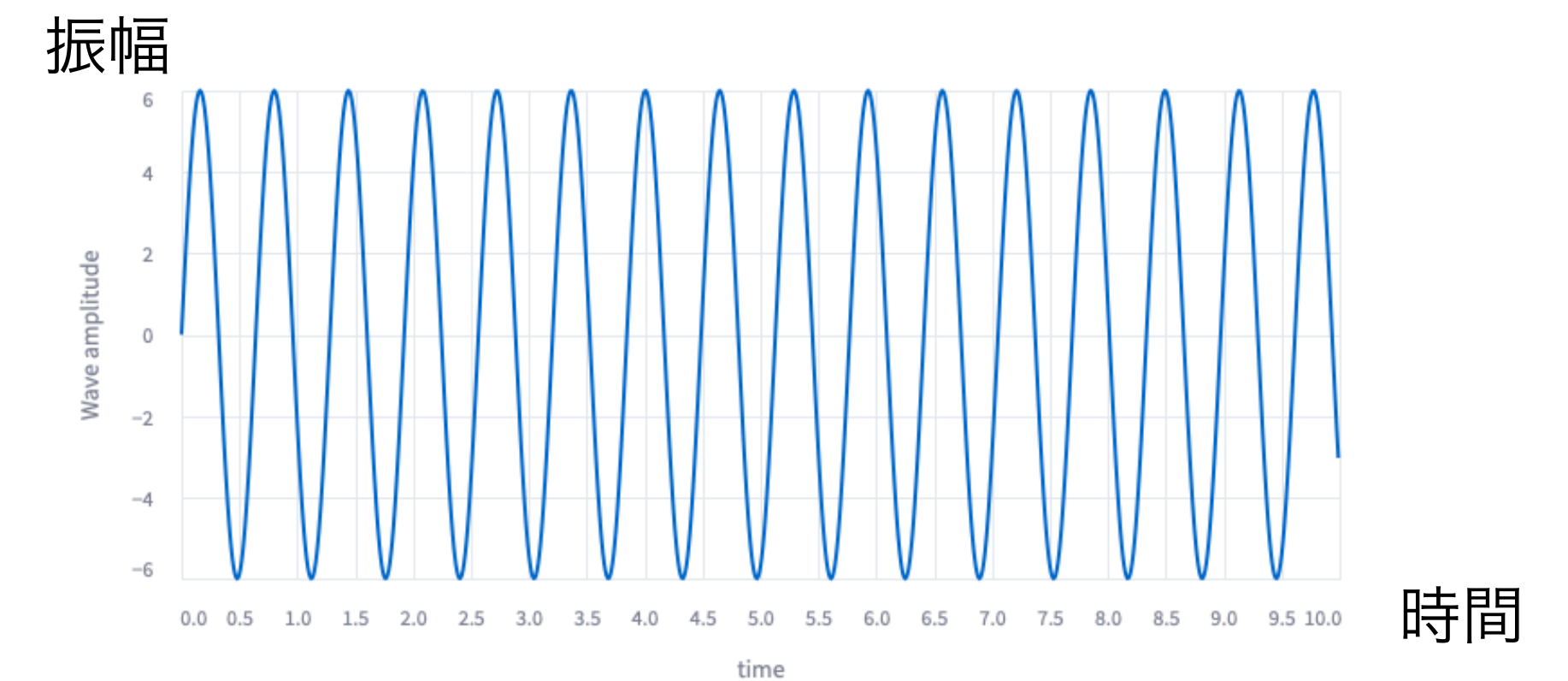
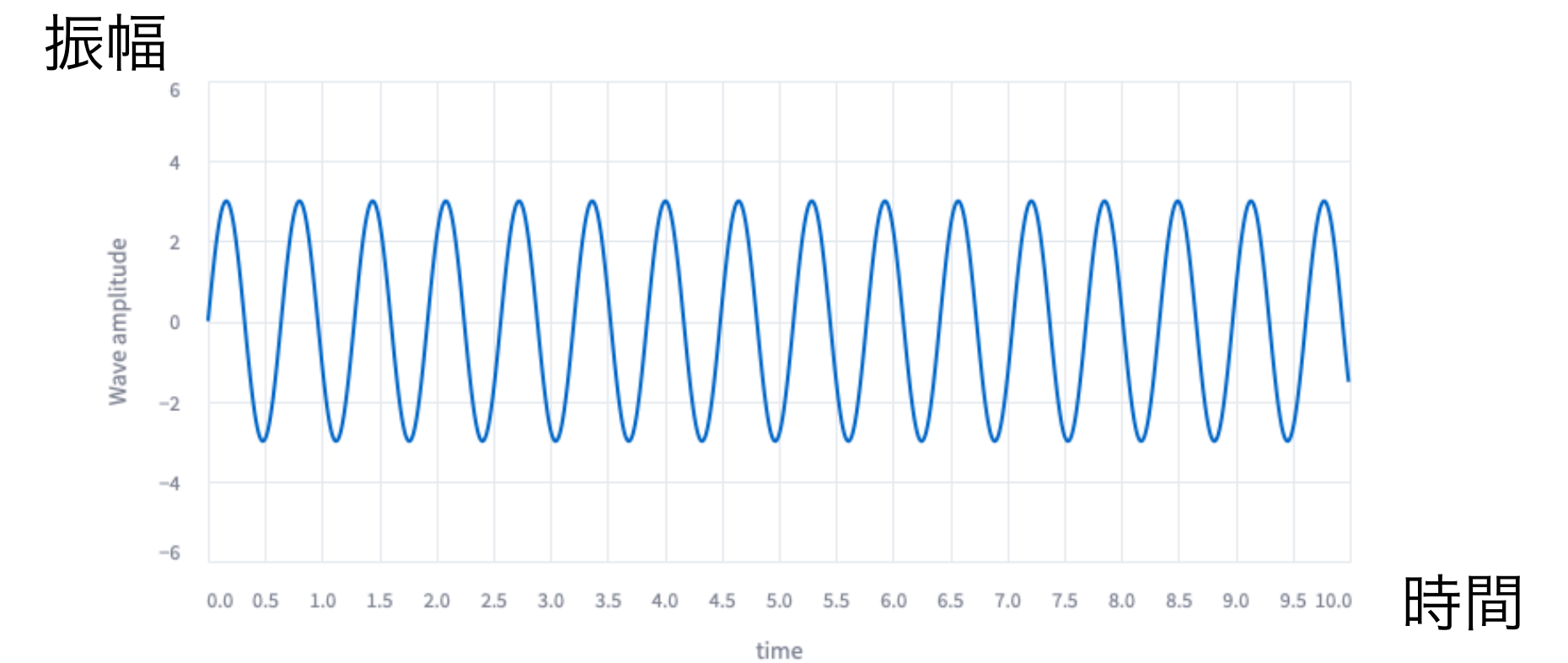
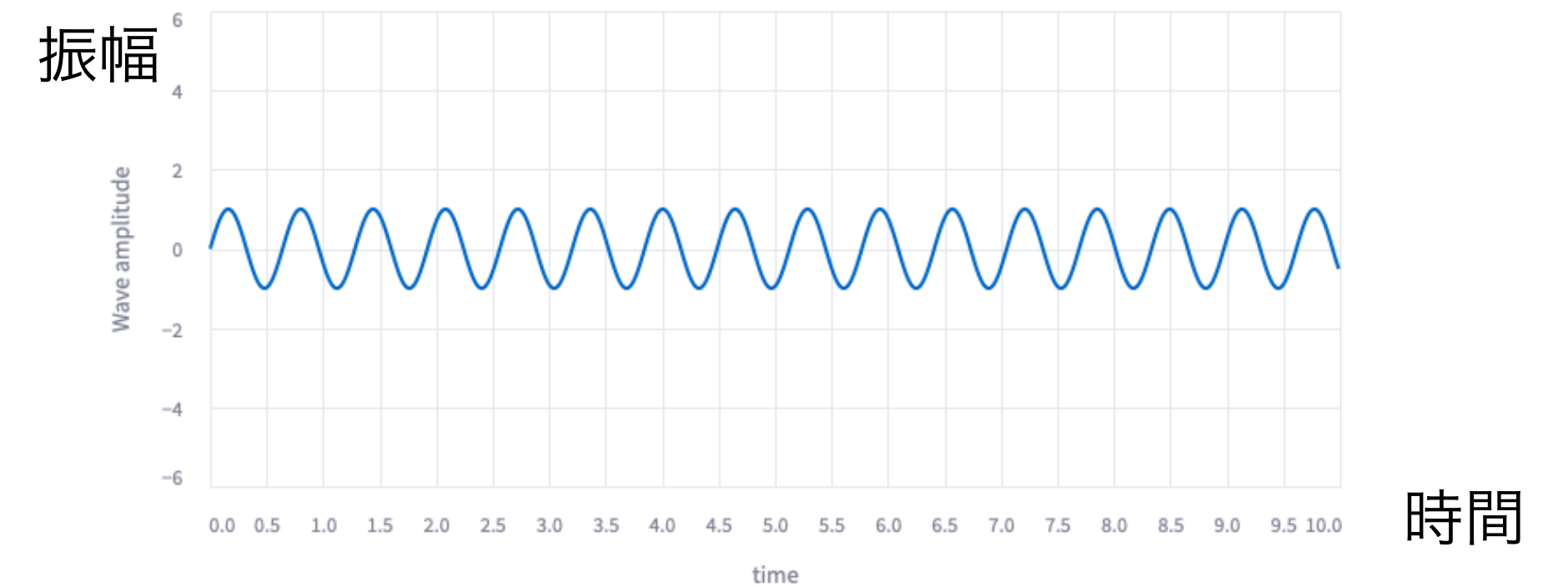


この波の音を
聴いてみよう▶



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.



波の振幅

波の**振幅**を変えると
音の**大きさ**が変わるよ.

この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶

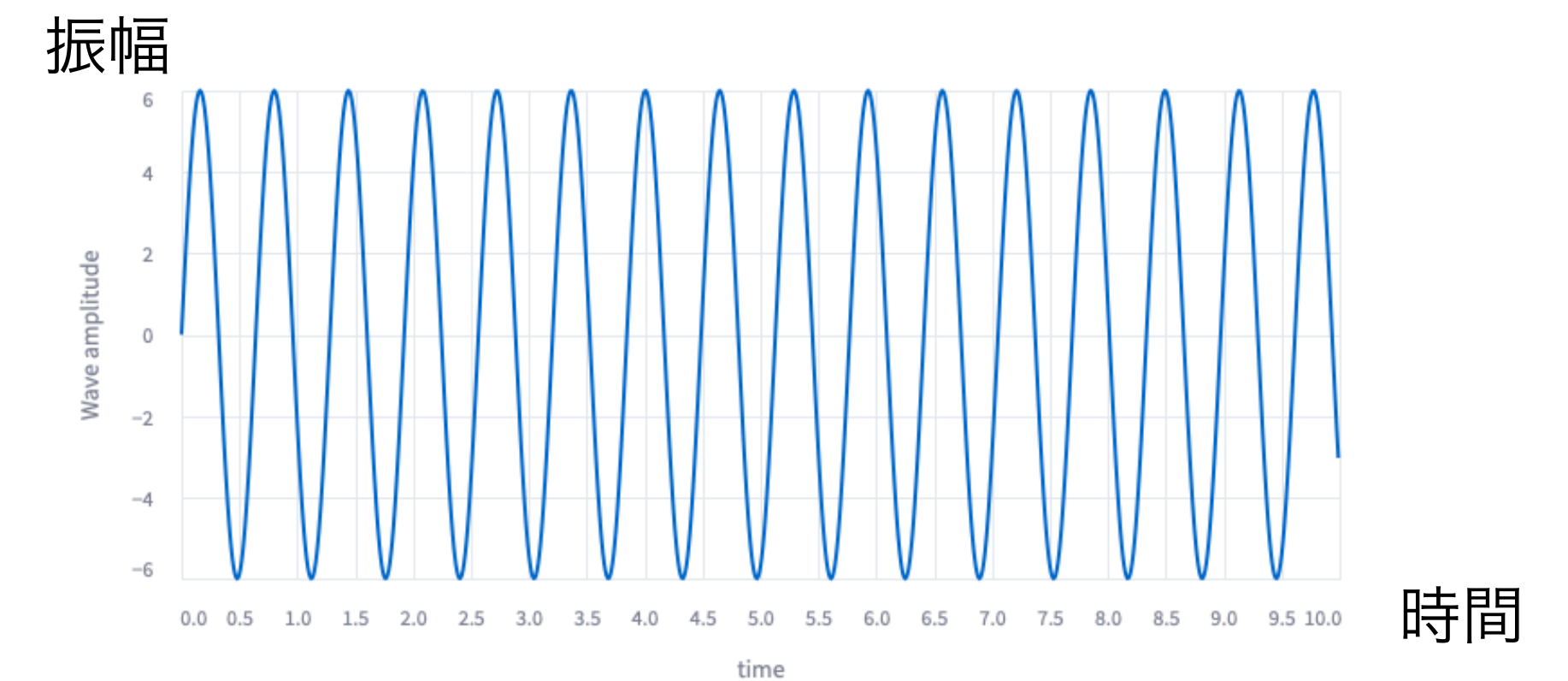
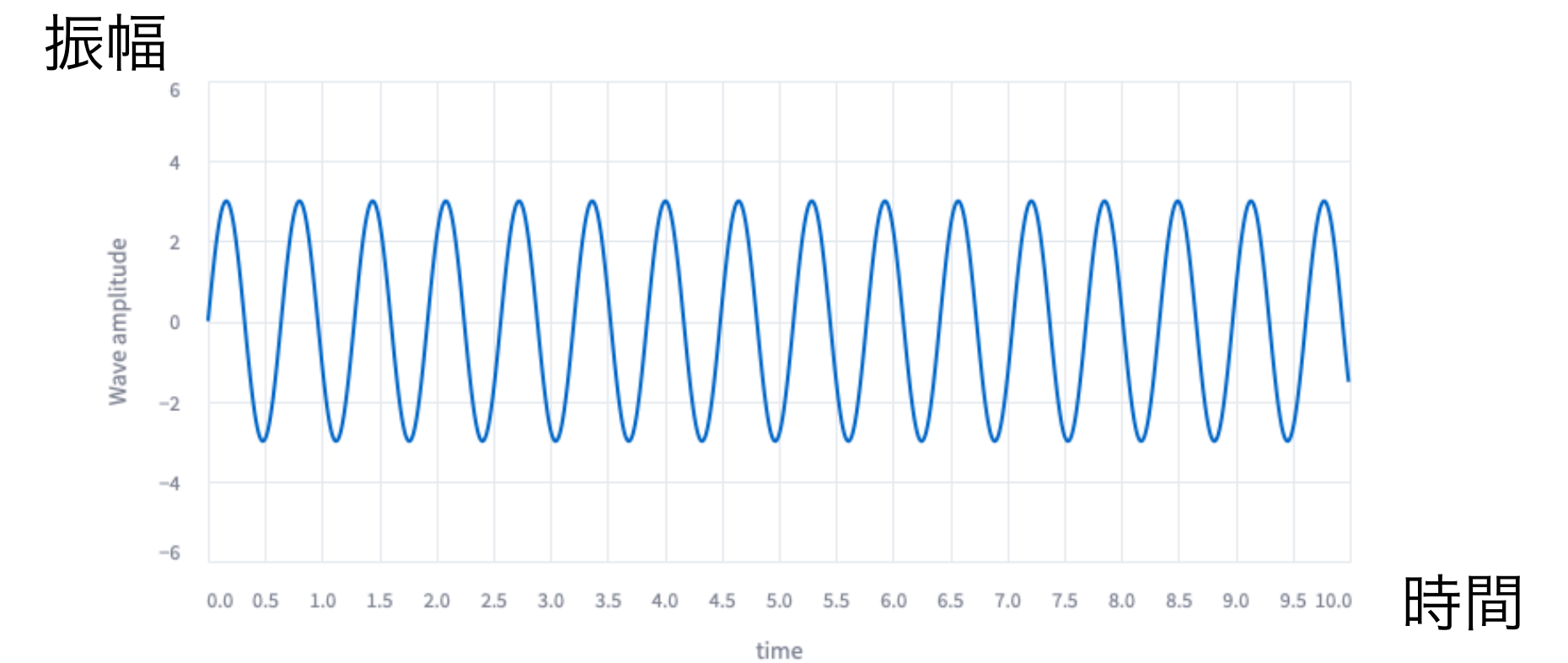
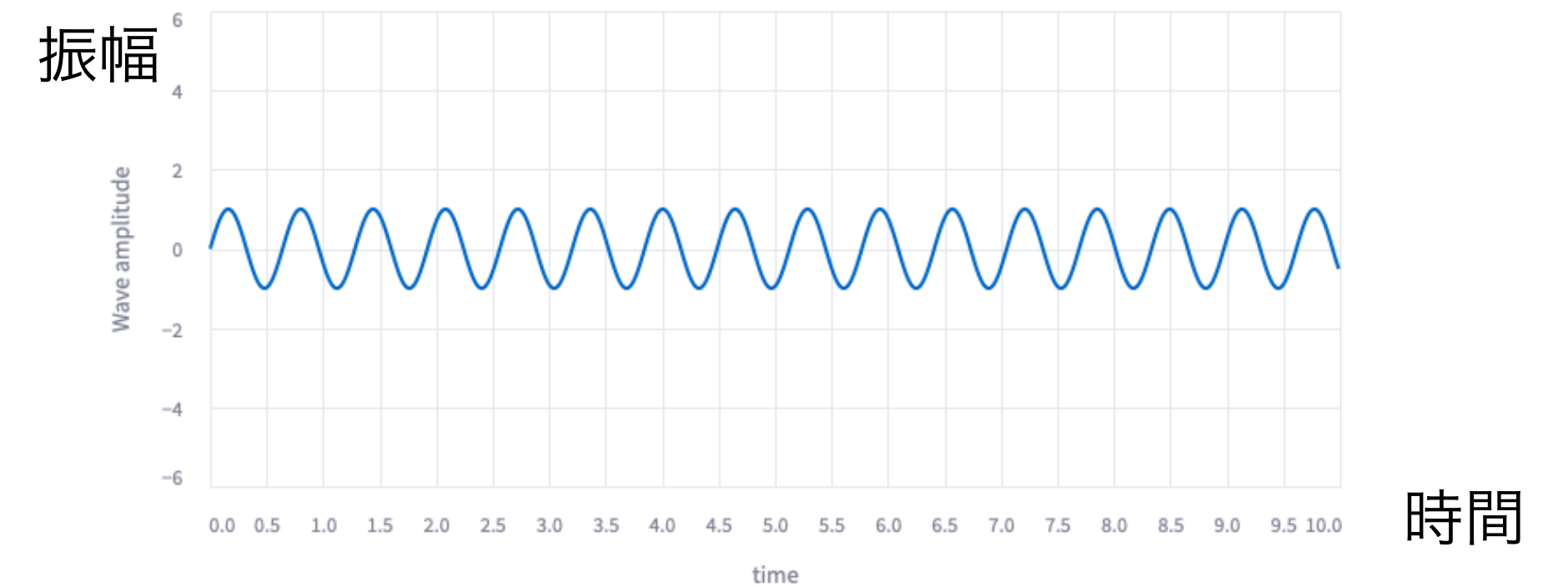


この波の音
再生中▶



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.



波の振動数(周波数)

波の振動数(周波数)を変えると
音の高さが変わるよ.

この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶

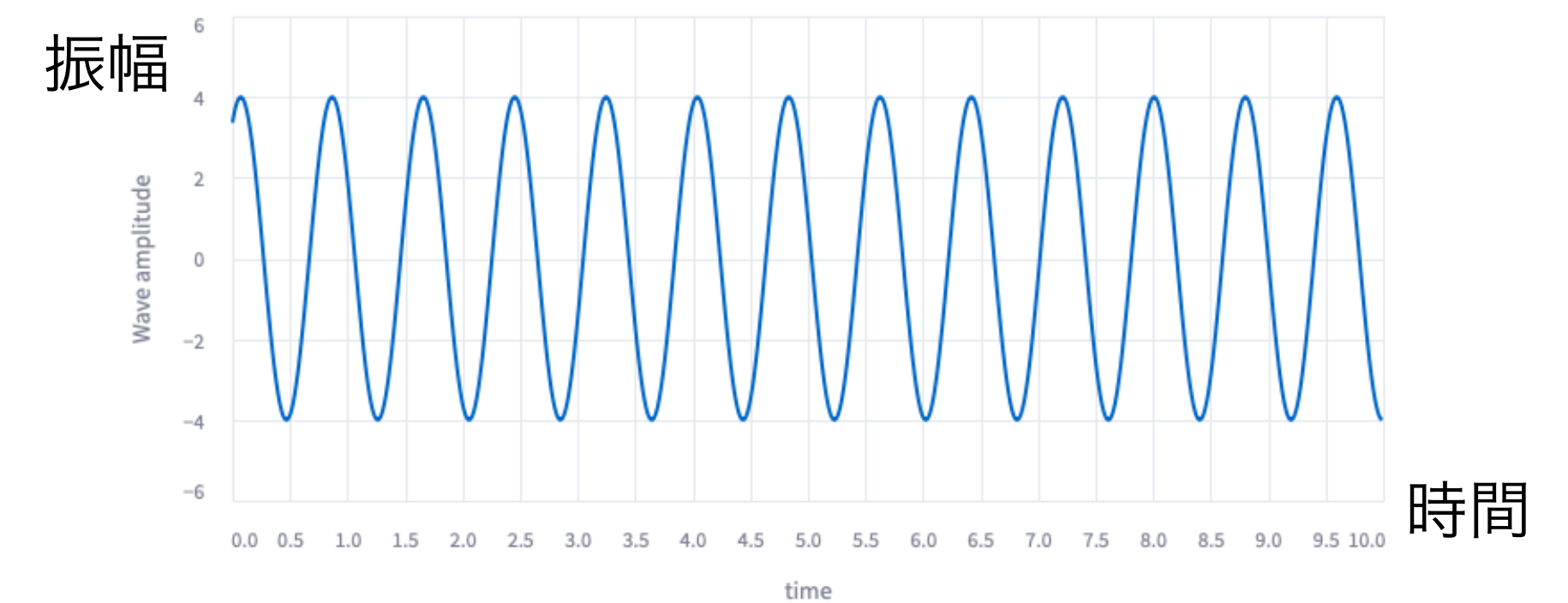
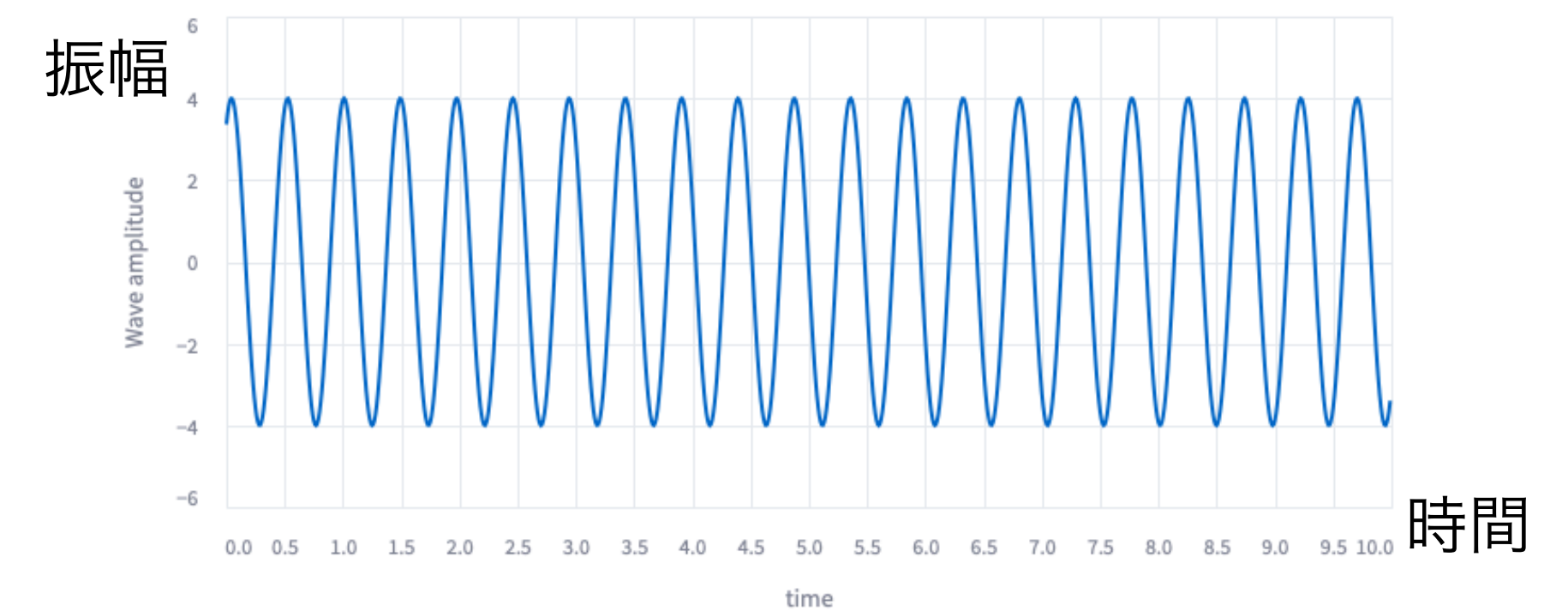
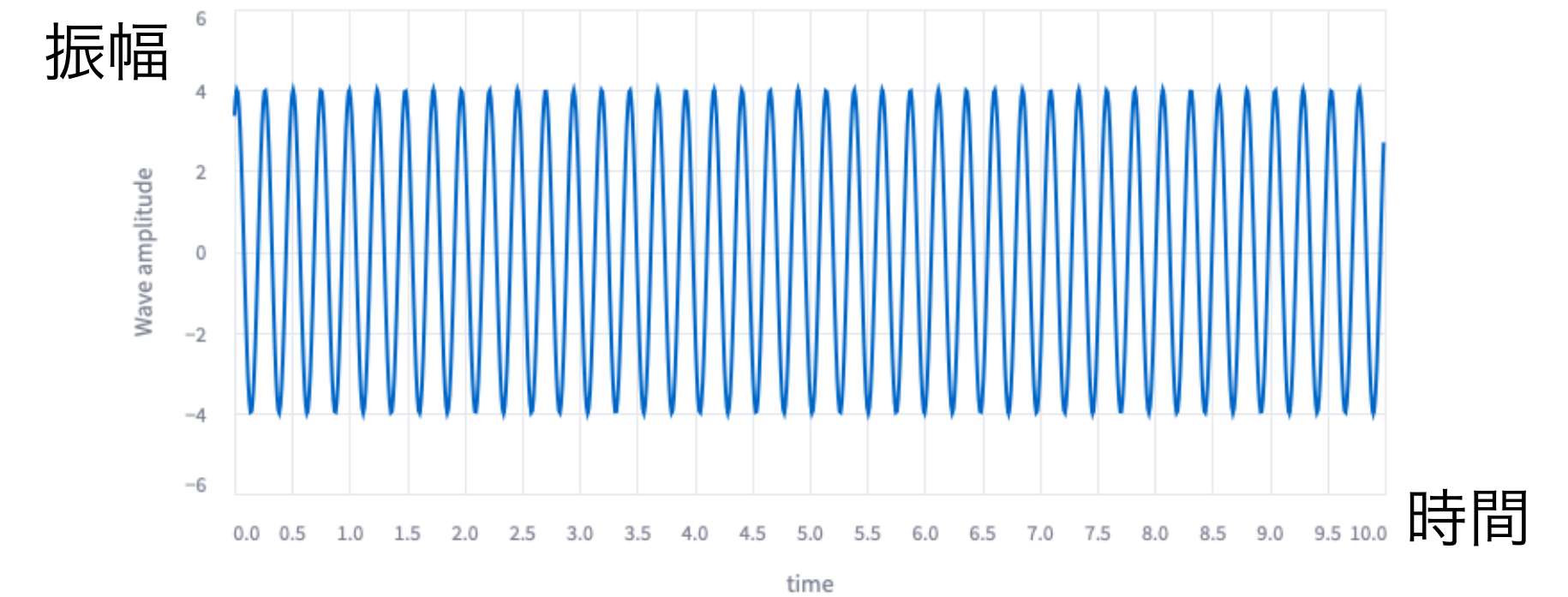


この波の音を
聴いてみよう▶



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.



波の振動数(周波数)

波の振動数(周波数)を変えると
音の高さが変わるよ.

この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶

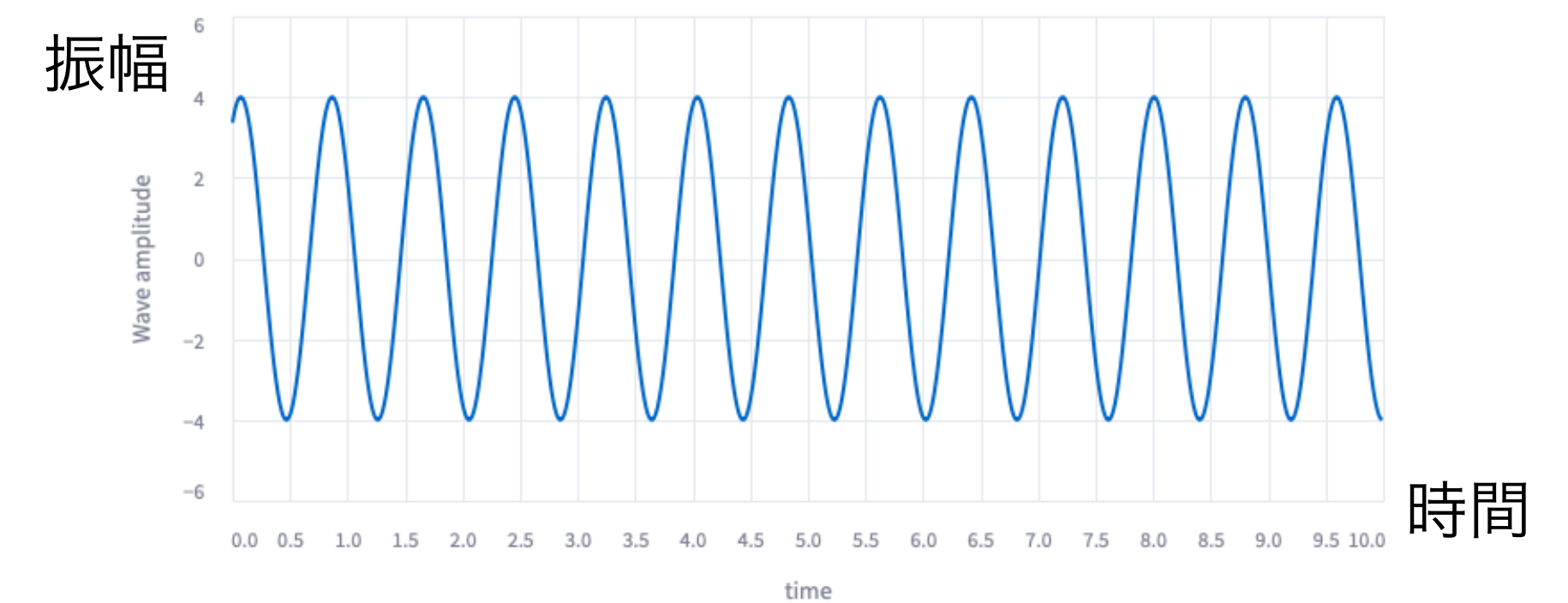
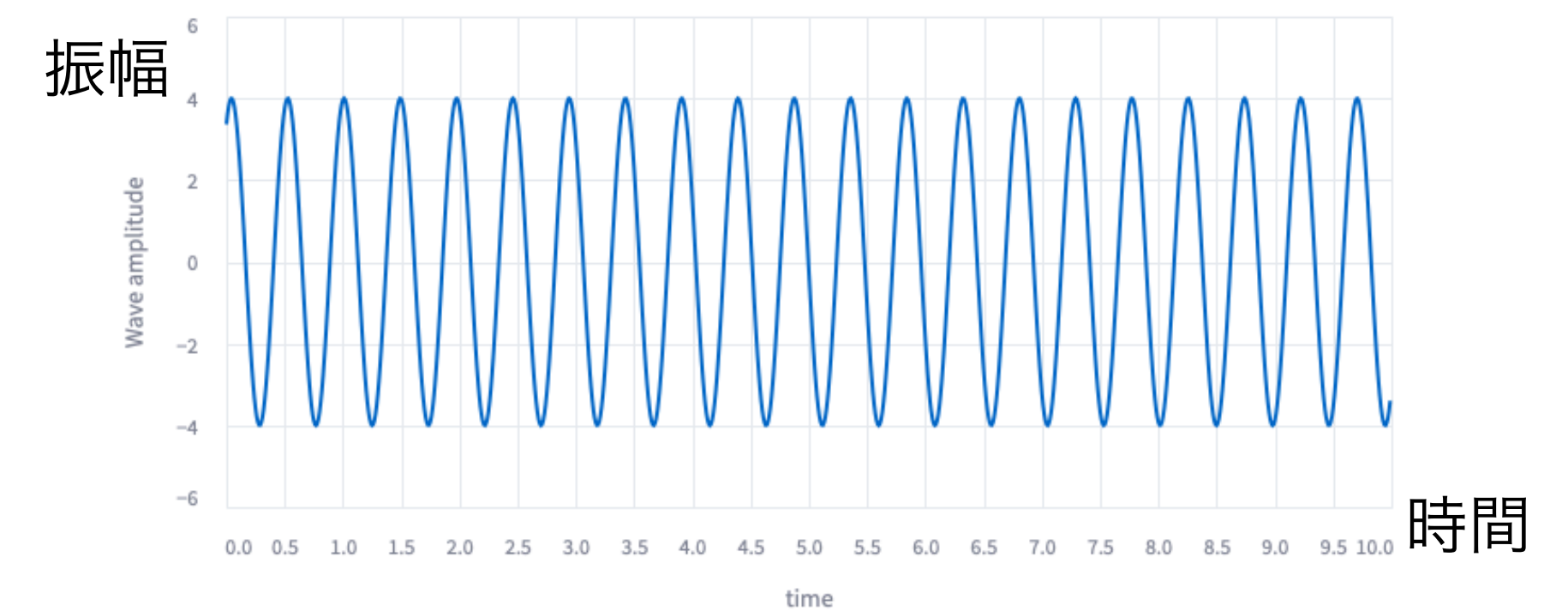
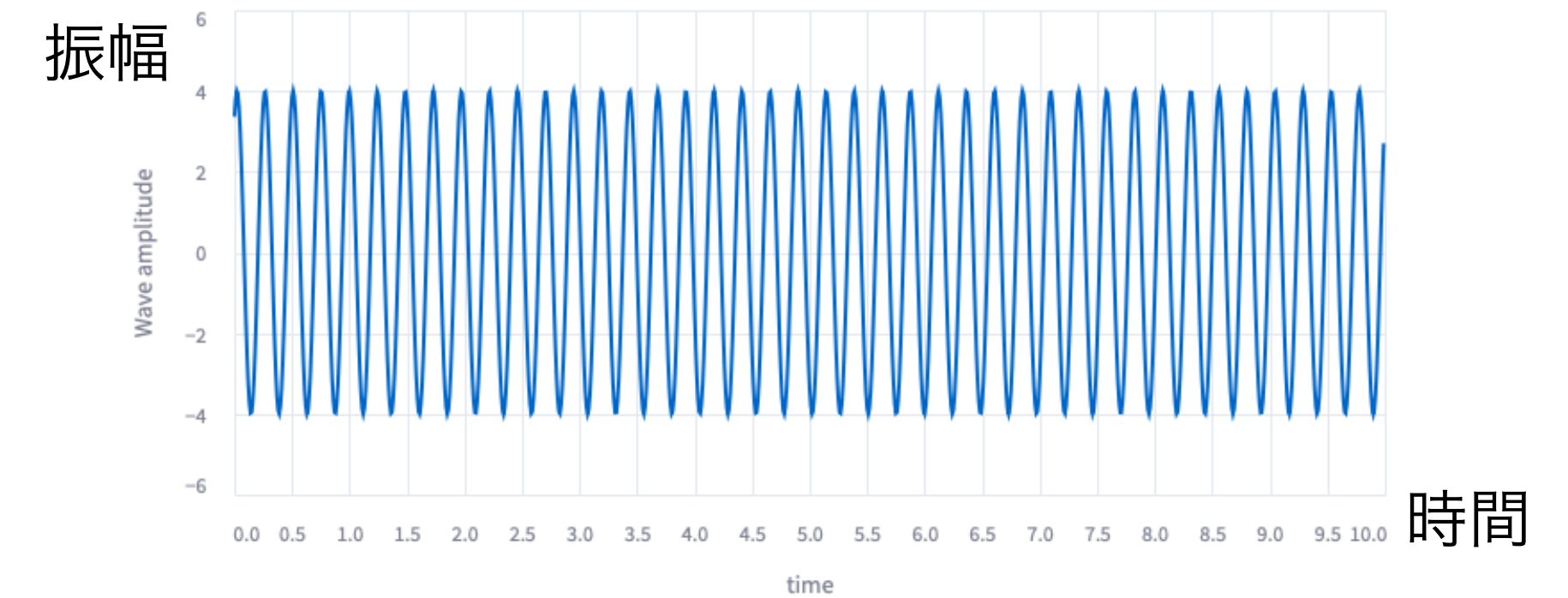


この波の音
再生中▶



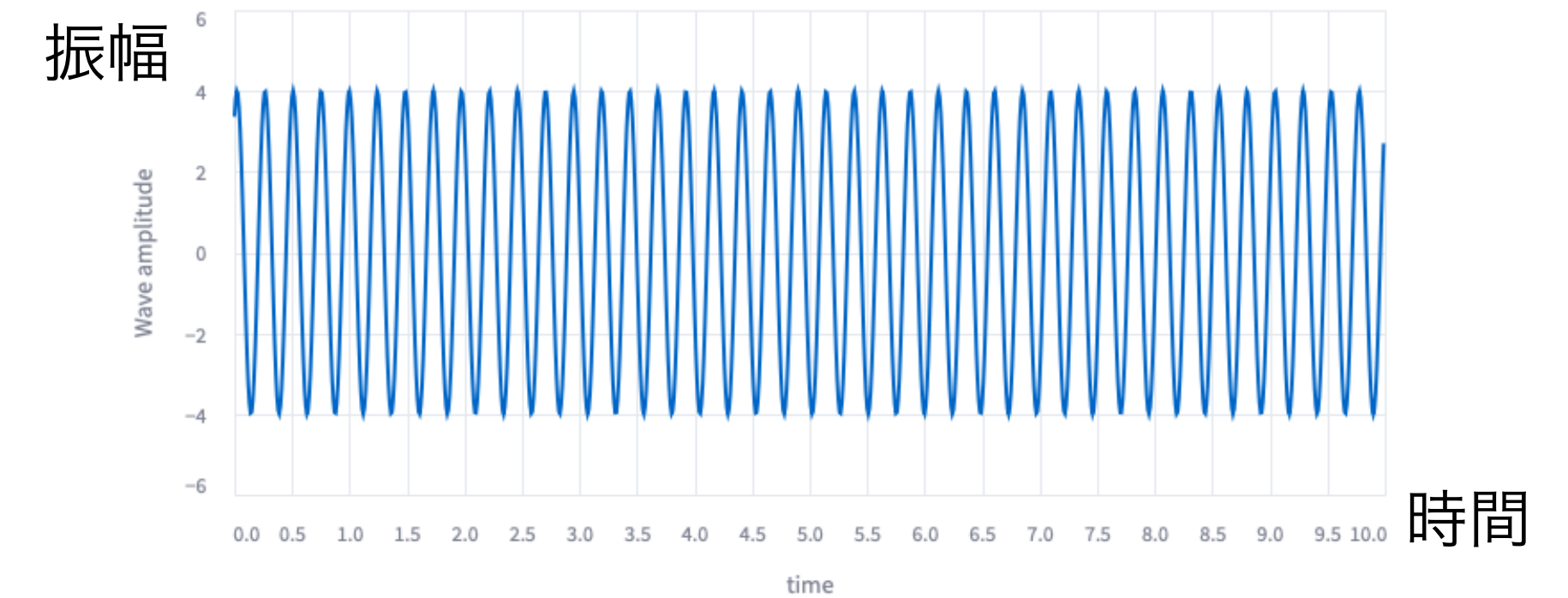
クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.



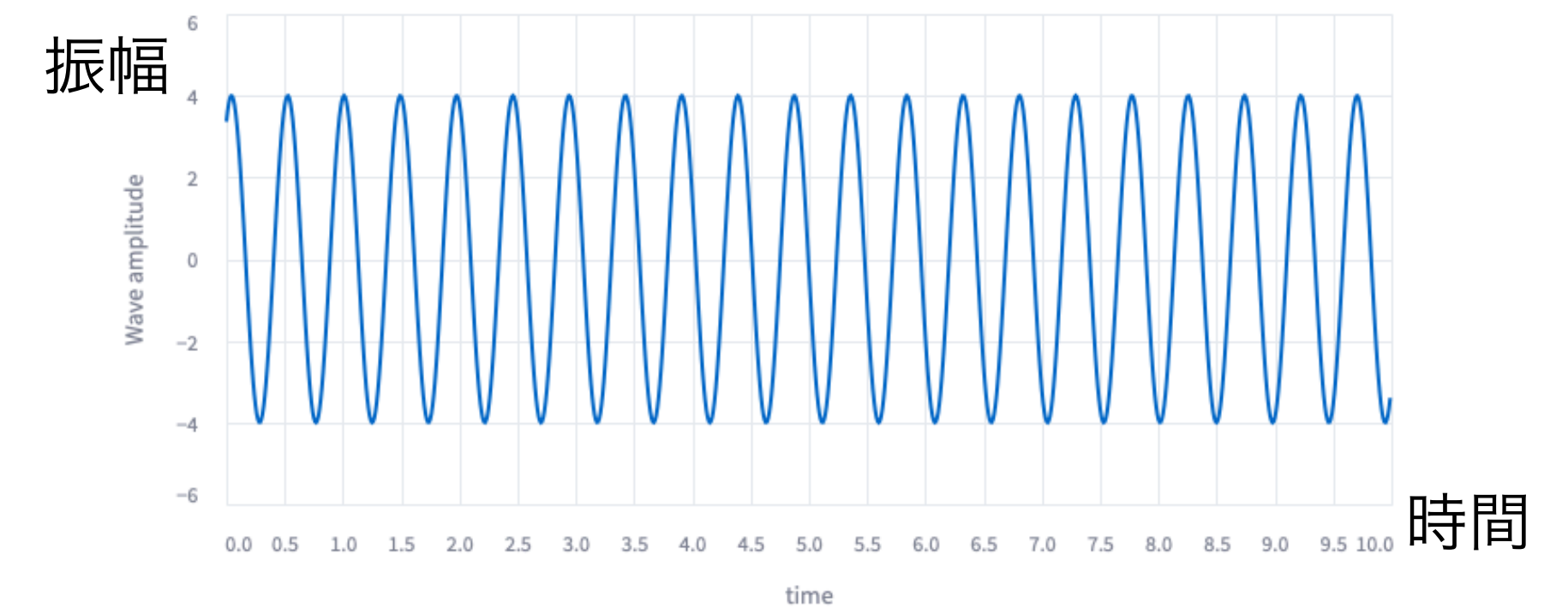
波の振動数(周波数)

この波の音を
聴いてみよう▶

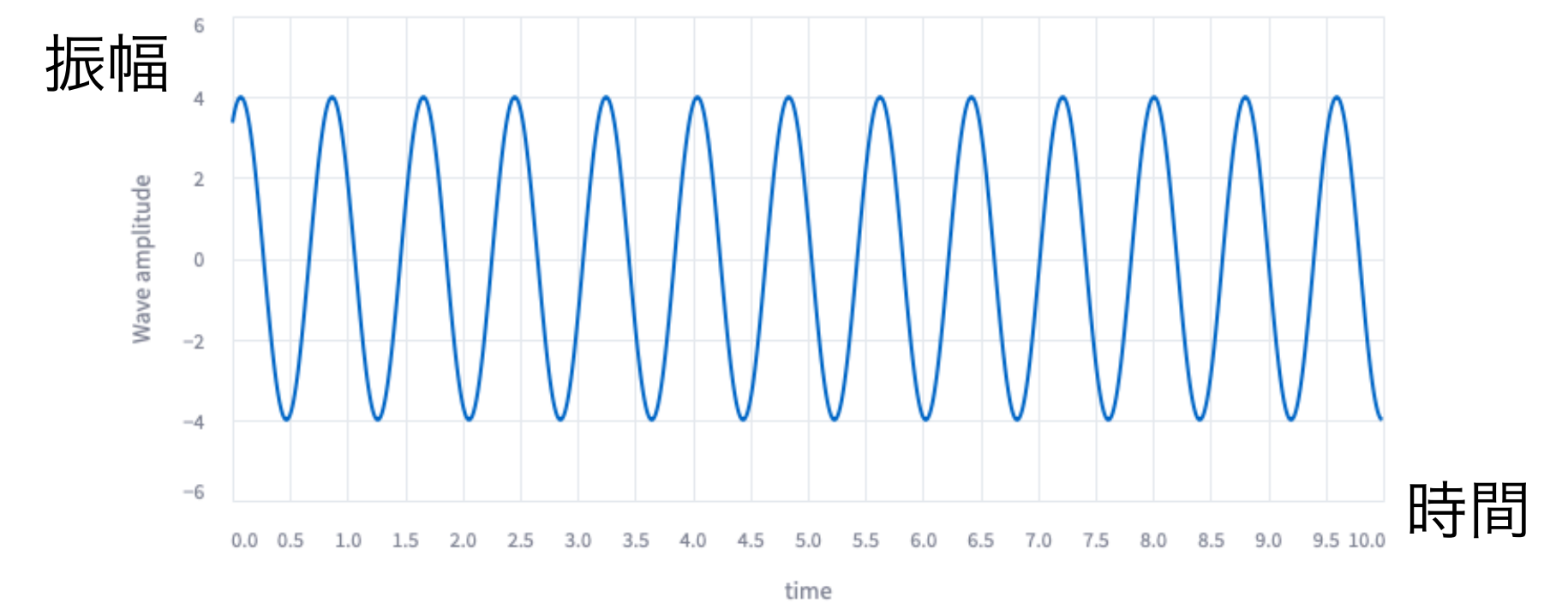


波の振動数(周波数)を変えると
音の高さが変わるよ.

この波の音
再生中▶



この波の音を
聴いてみよう▶



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。
You may hear the sound wave plotted above makes here.

波の振動数(周波数)

波の振動数(周波数)を変えると
音の高さが変わるよ.

この波の音
再生中▶



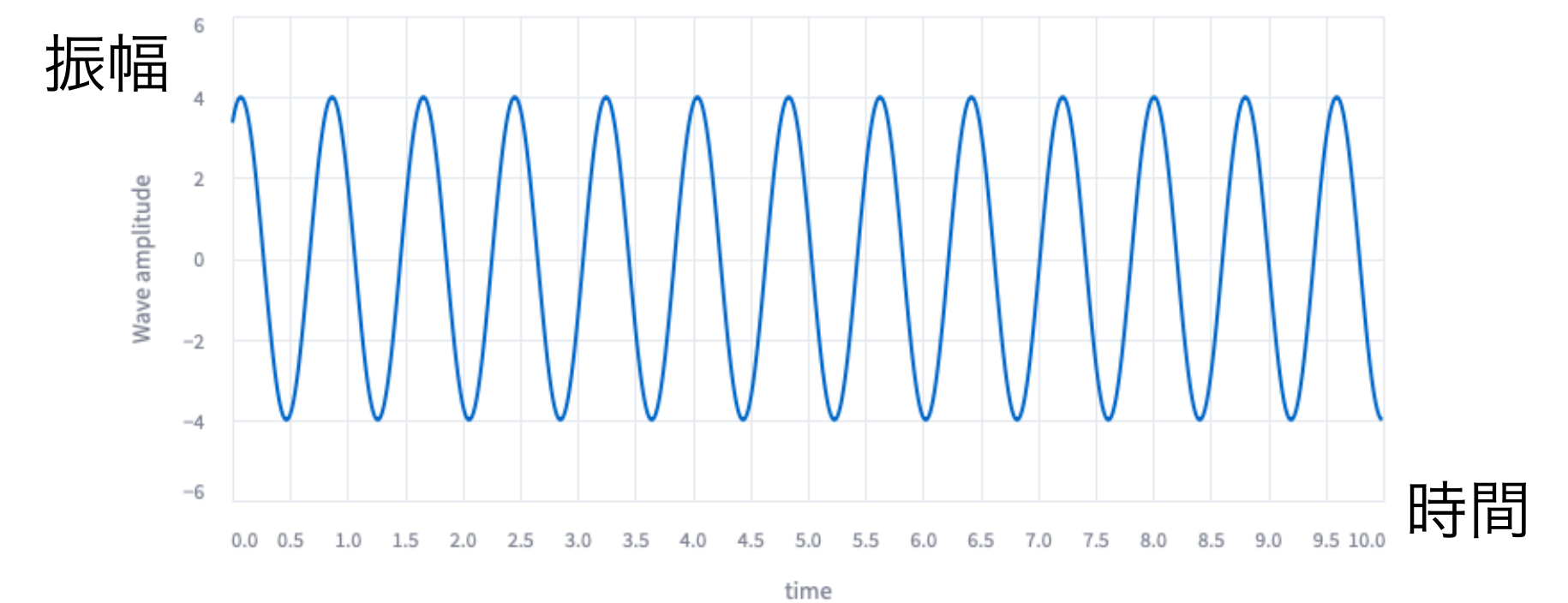
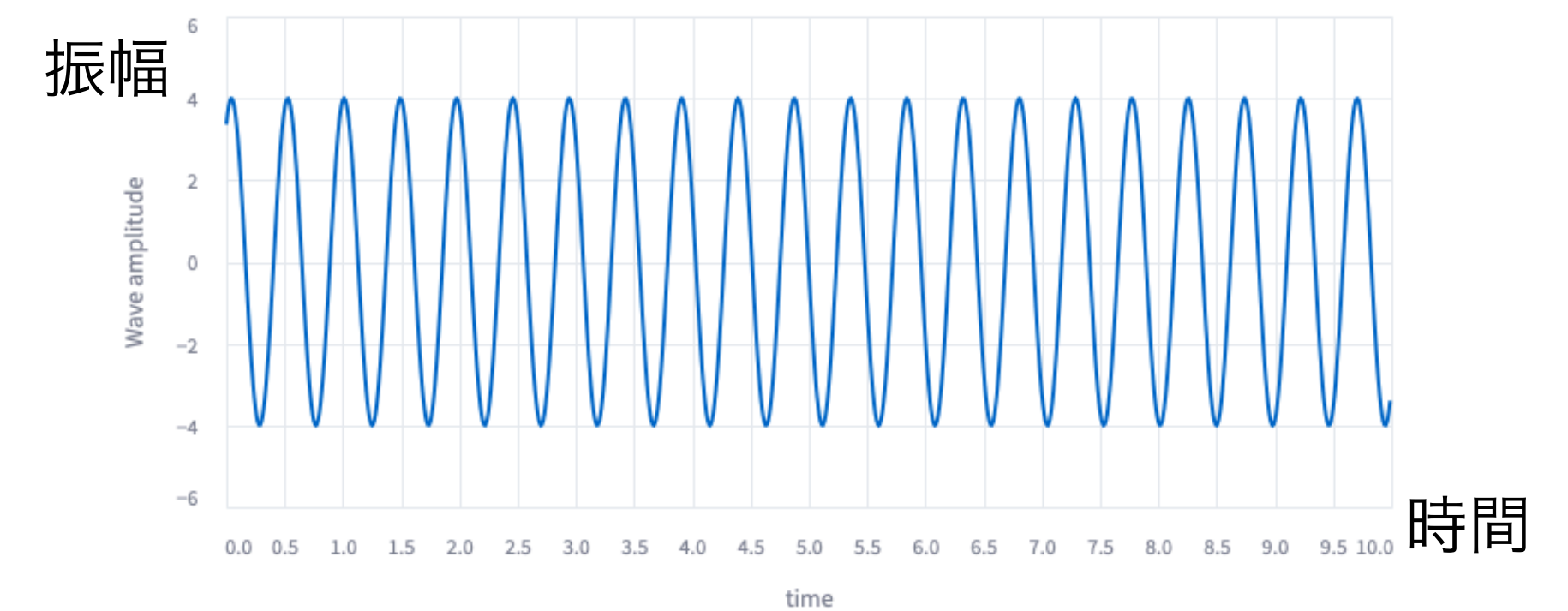
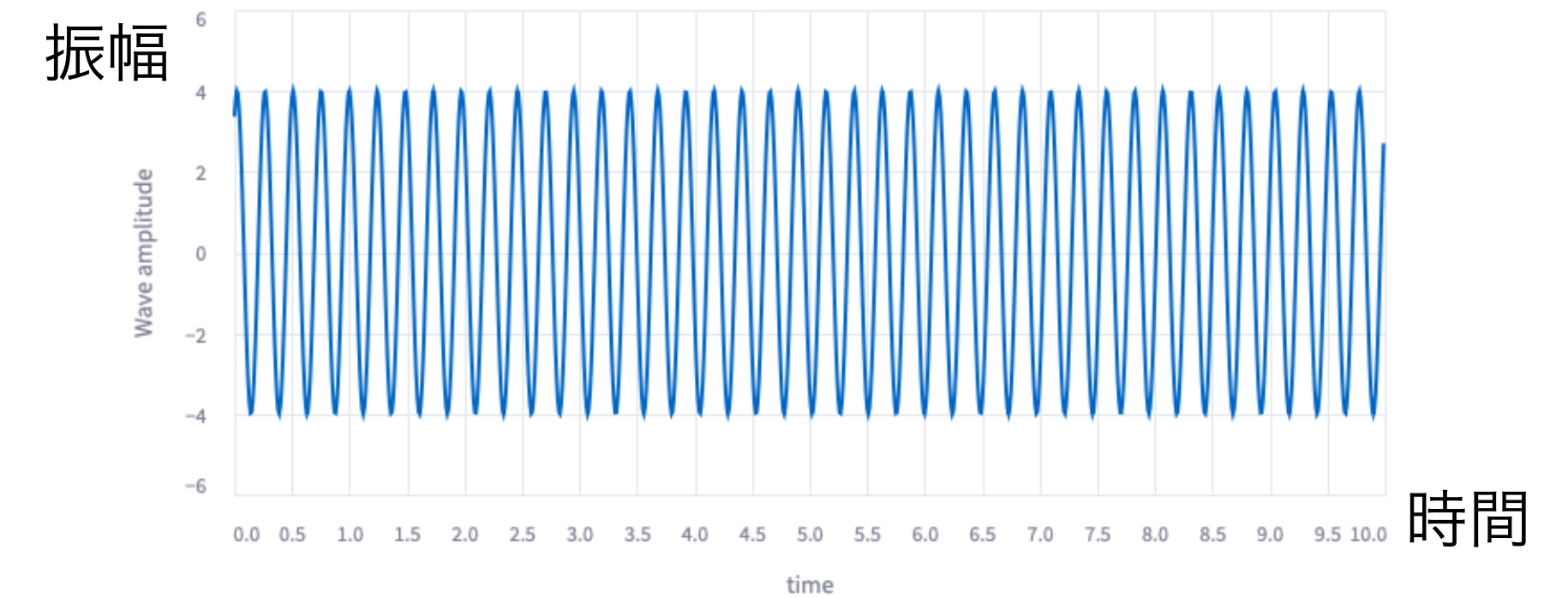
この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶



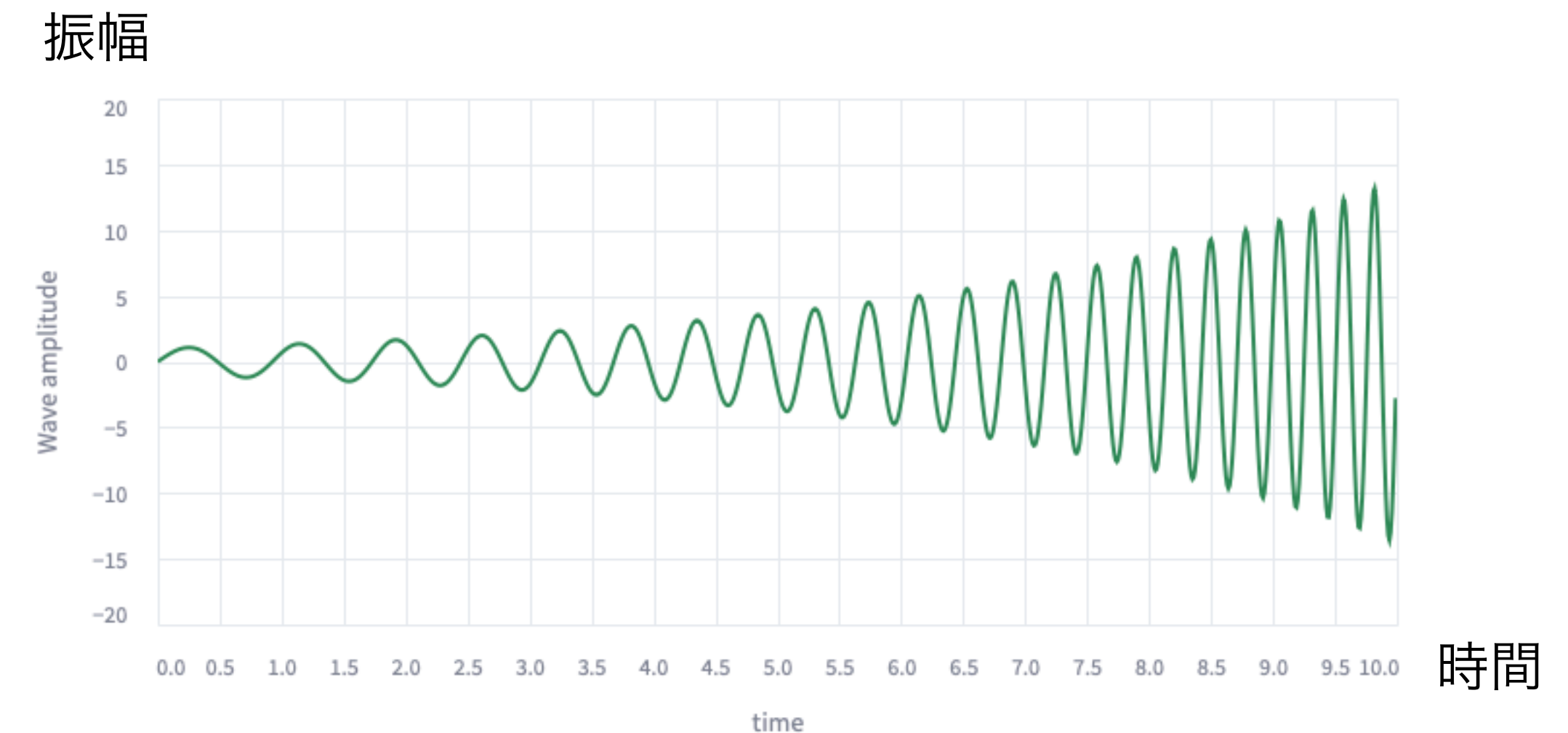
クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。
You may hear the sound wave plotted above makes here.



チャープ信号 (鳥のさえずり信号)

ここまでは振幅だけが変化する波または周波数だけが変化する波を見てきました。次は、これら2つの量が両方とも時間とともに増加する例を見てみましょう。

Now that we have seen waves that change in amplitude alone or frequency alone, let us see an example where both these quantities increase with time.



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.

これは「chirpチャープ(さえずり)」と呼ばれ、鳥の鳴き声に似ています。

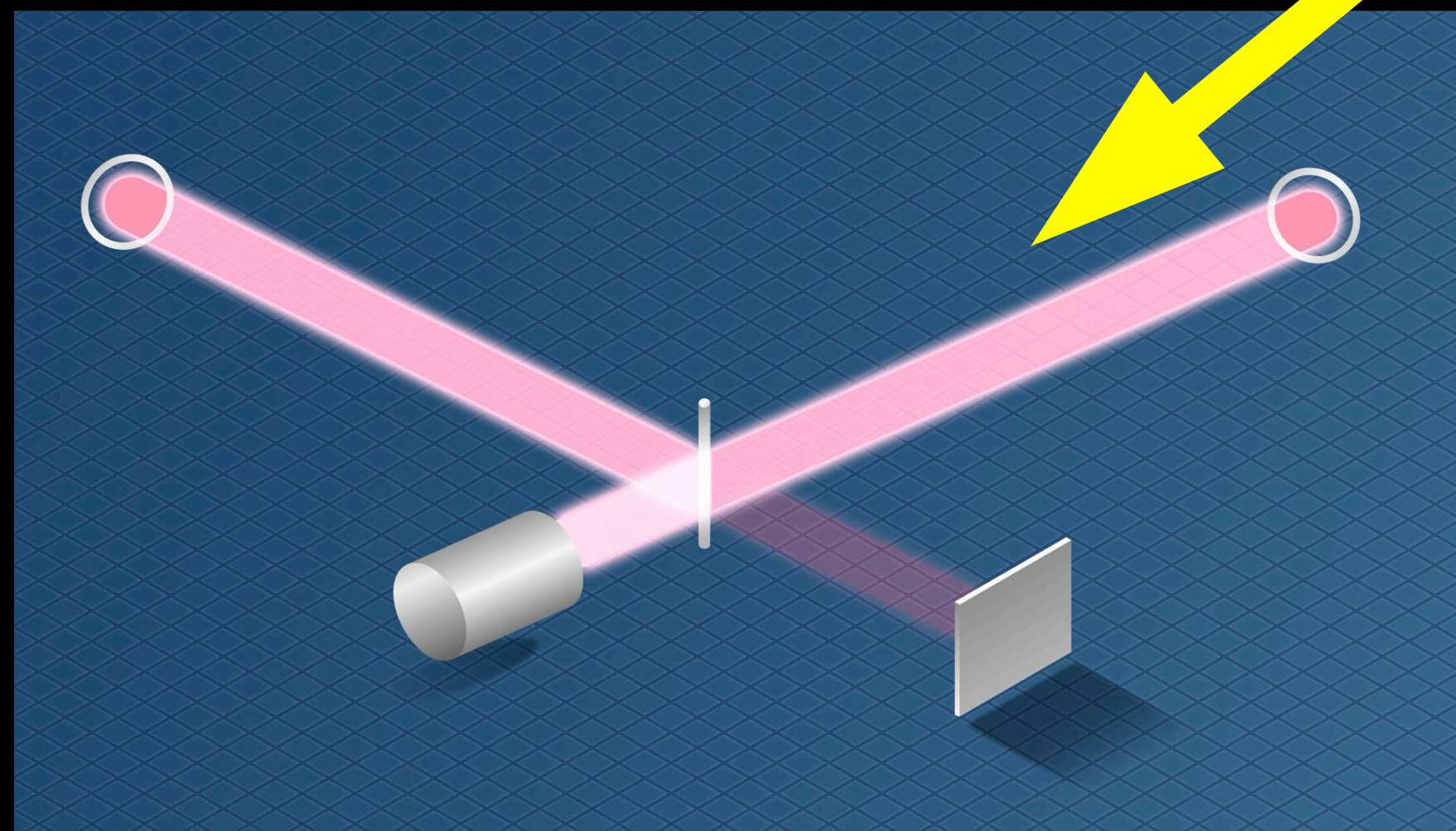
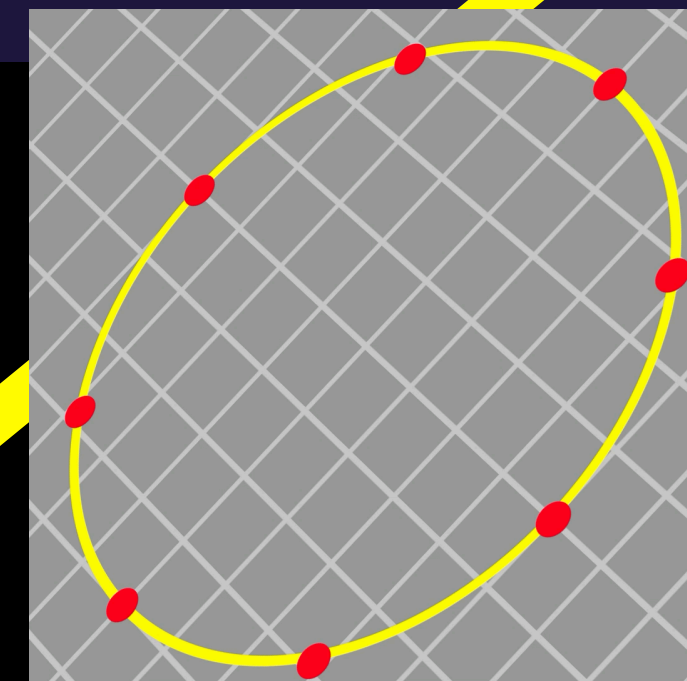
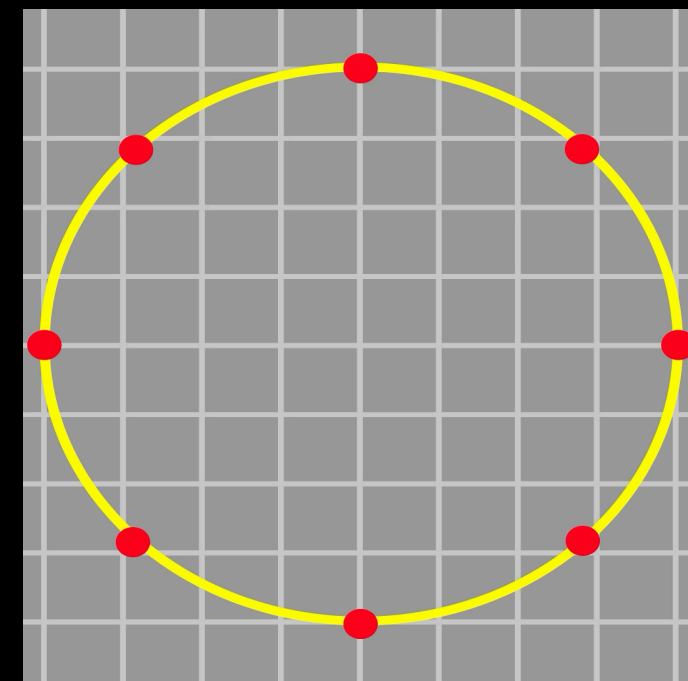
This is called a chirp, being similar to the sound some birds make.

このような音を発するものを他に知っていますか？

Do you know of any other thing(s) that make such a sound?

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



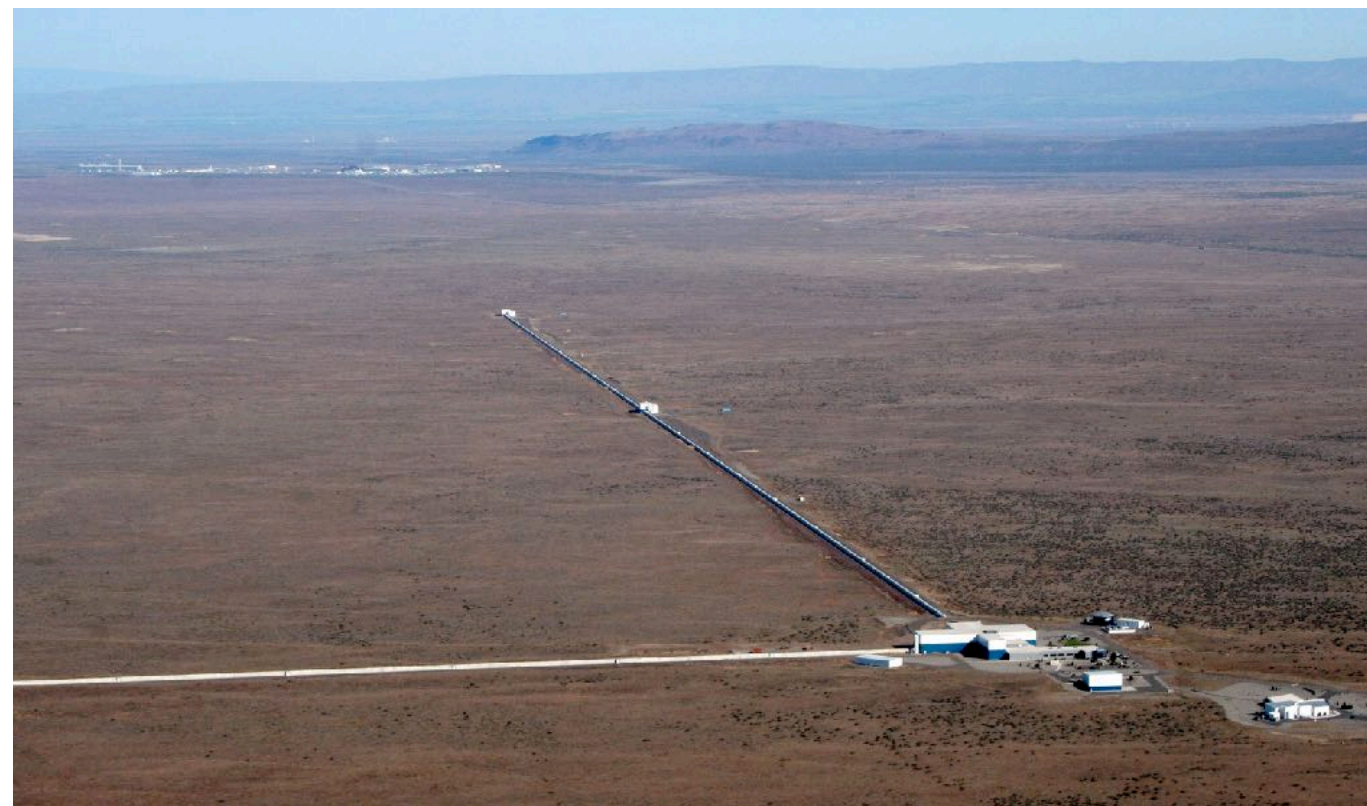
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

振幅は 10^{-22} 太陽地球距離で水素原子一つ分

世界の重力波天文台（レーザー干渉計）

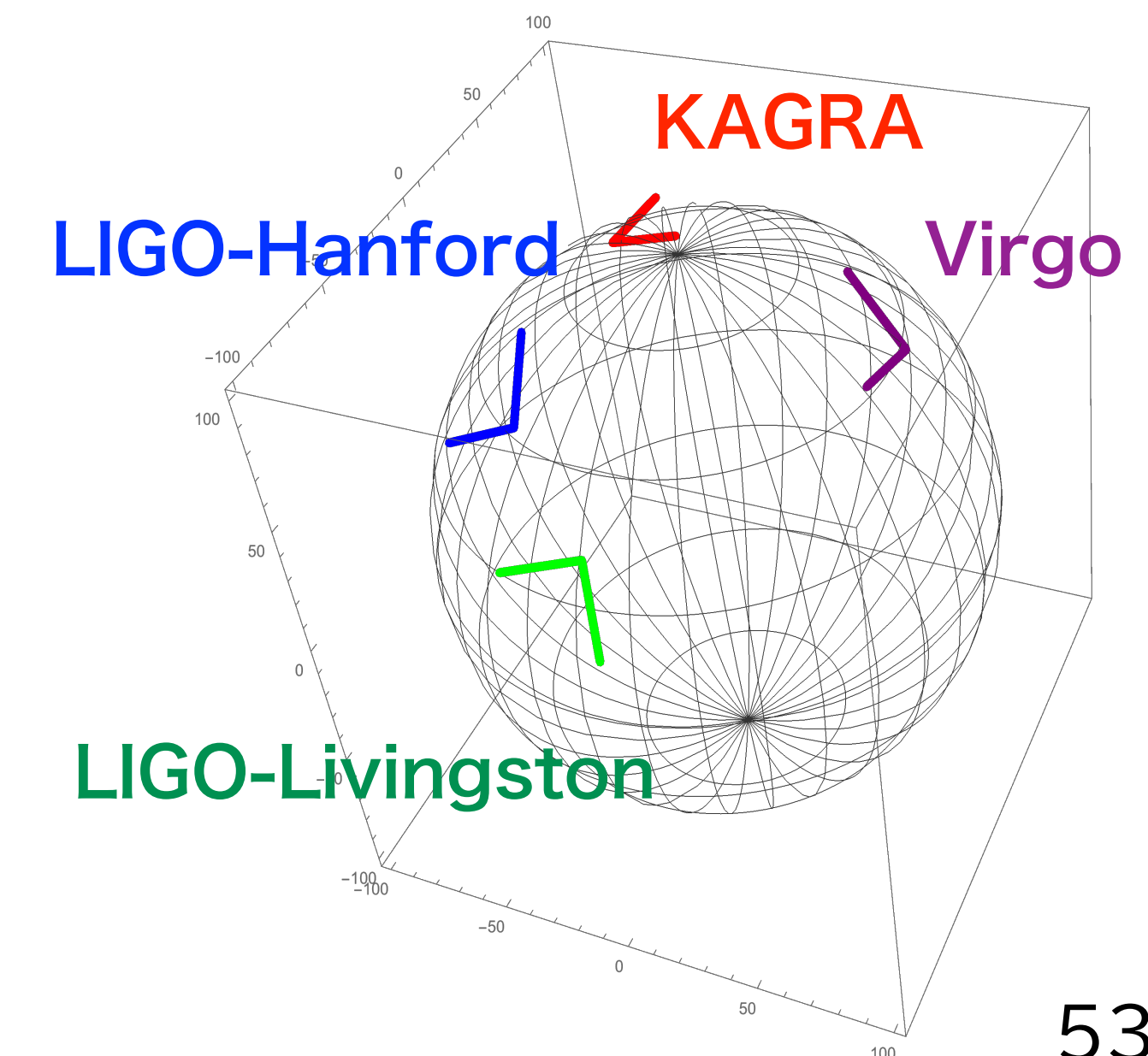
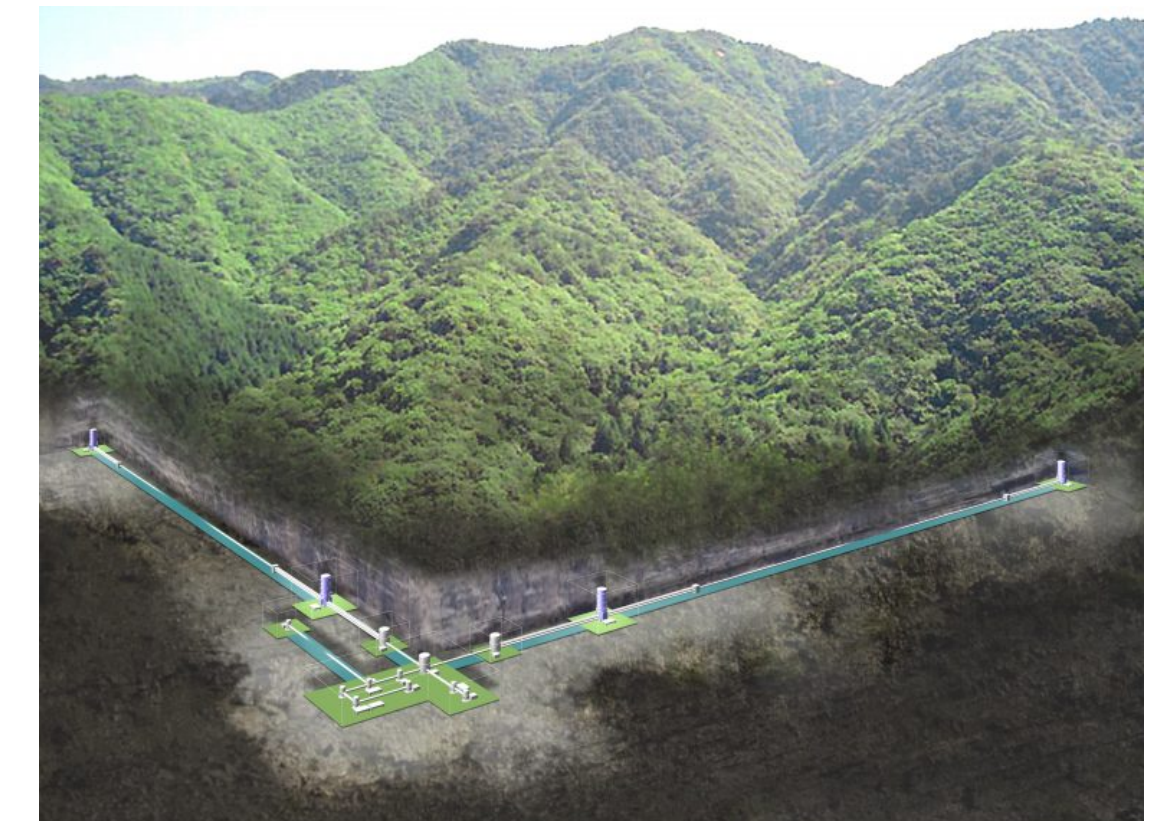
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)



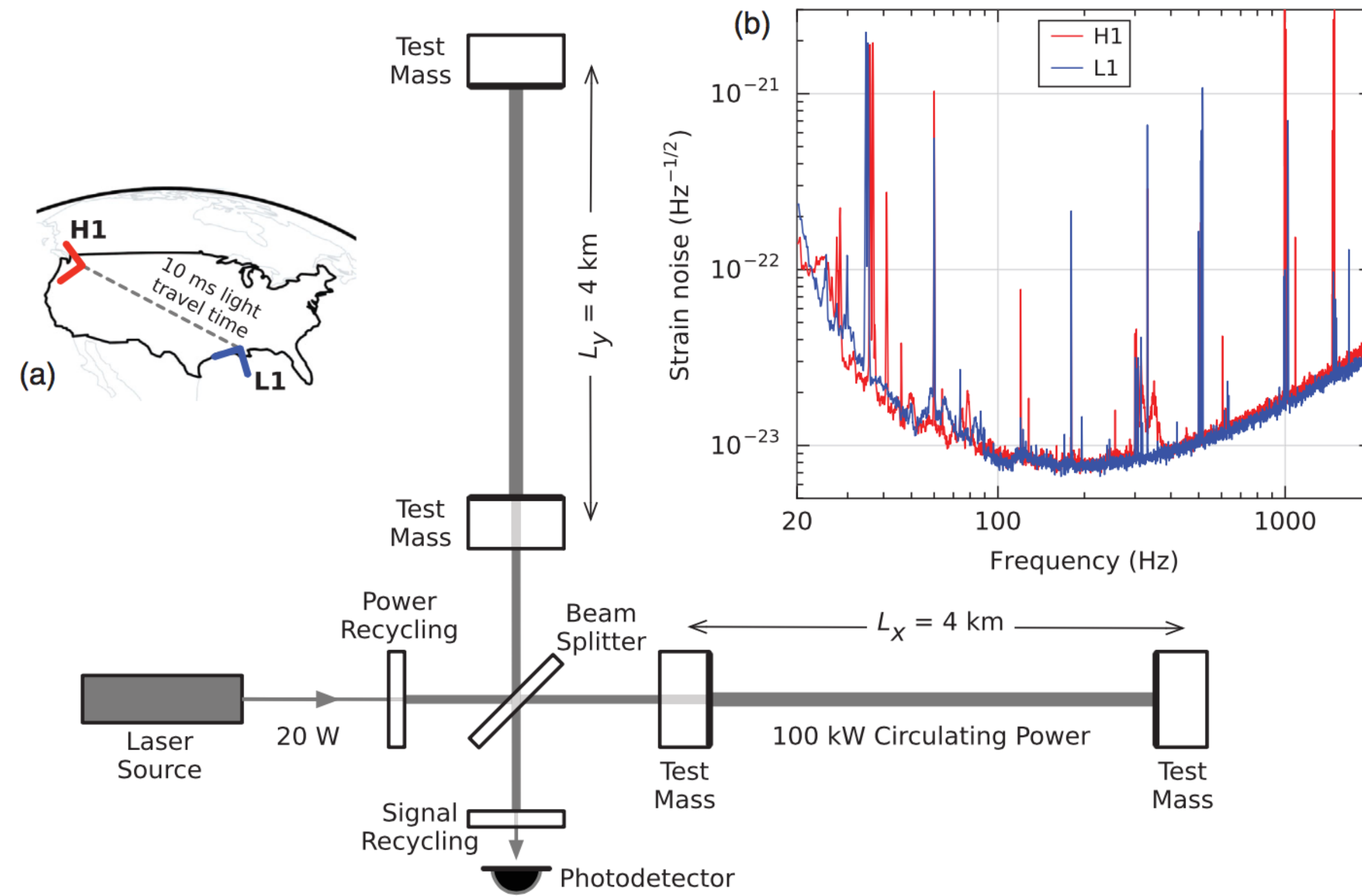


FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the wave; these length changes are reversed during the other half-cycle. The output photodetector records these differential cavity length variations. While a detector's directional response is maximal for this case, it is still significant for most other angles of incidence or polarizations (gravitational waves propagate freely through the Earth). *Inset (a)*: Location and orientation of the LIGO detectors at Hanford, WA (H1) and Livingston, LA (L1). *Inset (b)*: The instrument noise for each detector near the time of the signal detection; this is an amplitude spectral density, expressed in terms of equivalent gravitational-wave strain amplitude. The sensitivity is limited by photon shot noise at frequencies above 150 Hz, and by a superposition of other noise sources at lower frequencies [47]. Narrow-band features include calibration lines (33–38, 330, and 1080 Hz), vibrational modes of suspension fibers (500 Hz and harmonics), and 60 Hz electric power grid harmonics.

重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日



“We had detected gravitational waves. We did it.”

“我々は、重力波を検出した。 やり遂げたのだ。”

<https://www.youtube.com/watch?v=aEPlwEJmZyE>

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



四国新聞だけ
ちがった. . . 残念 (笑)

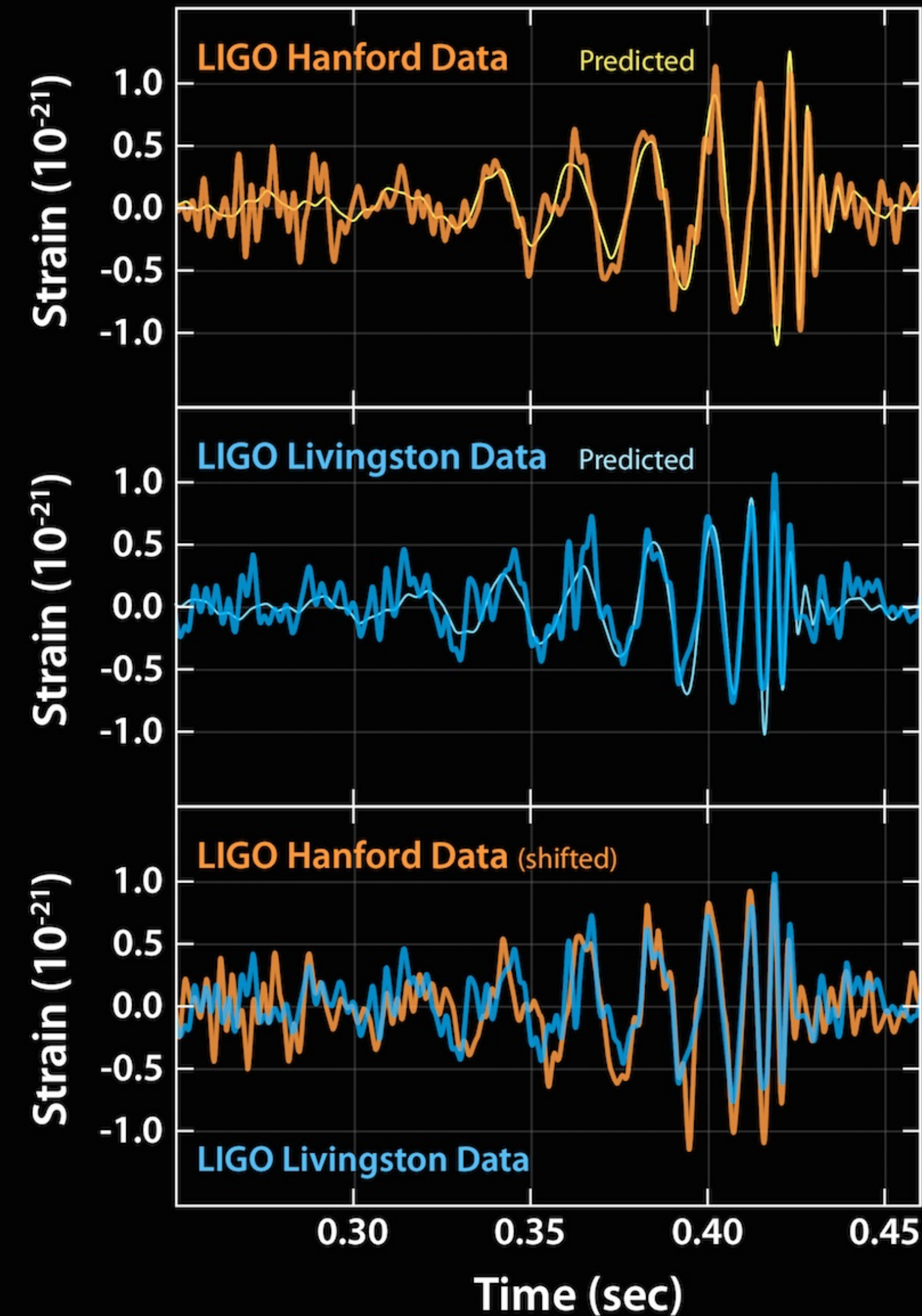


2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

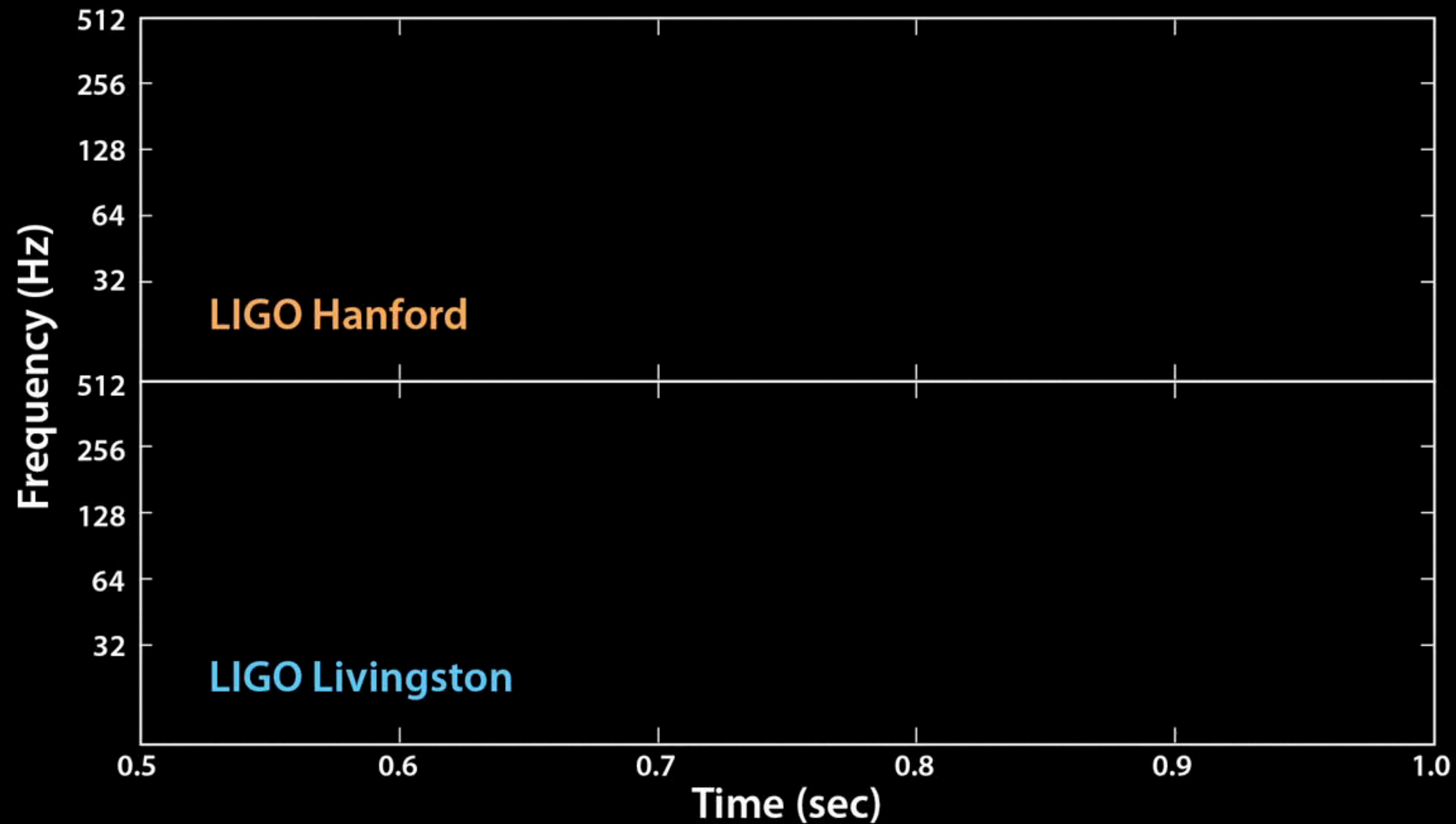


ブラックホール連星の合体
によって生じた重力波だった

2015年9月14日



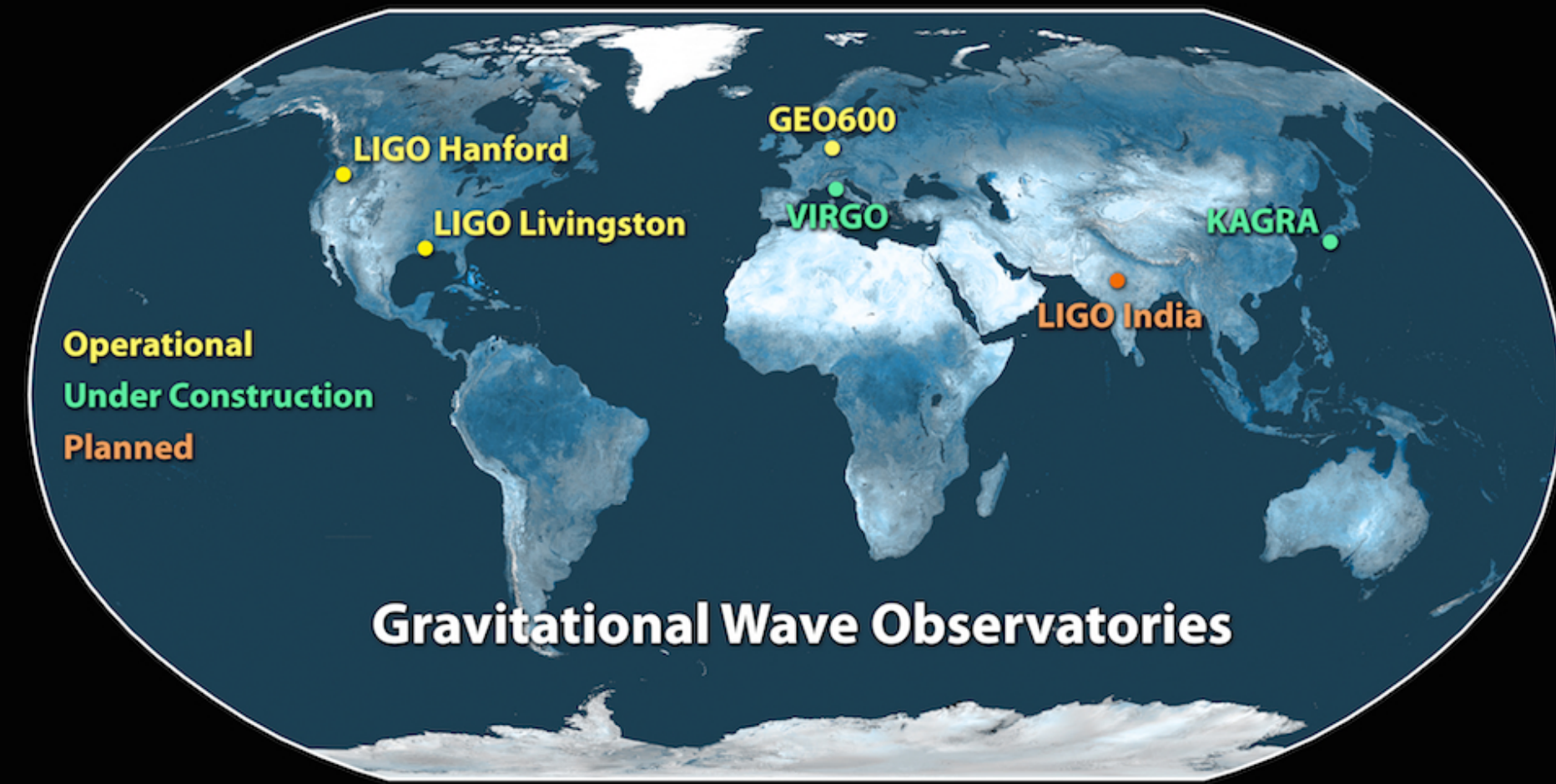
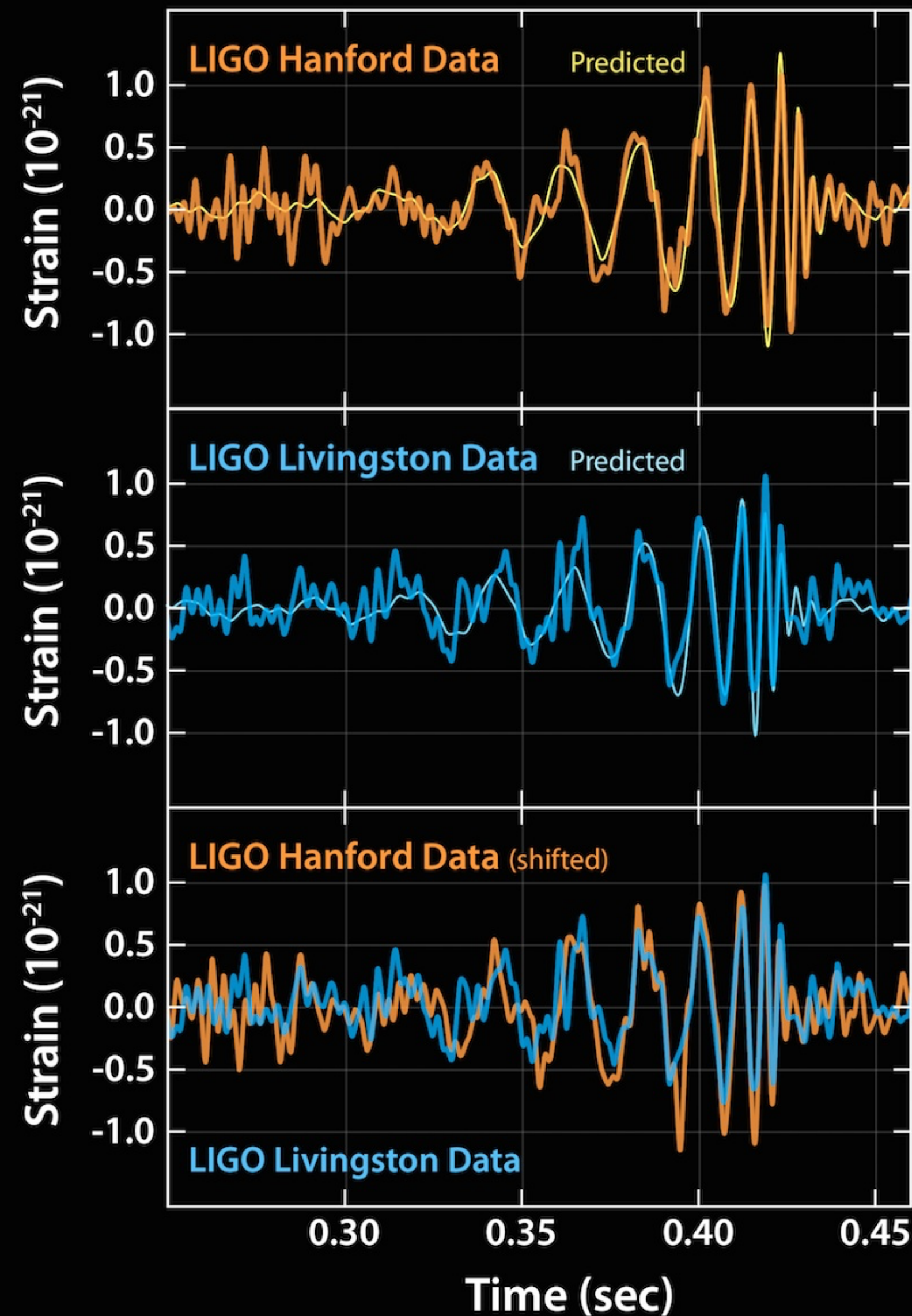
重力波波形を音にすると. . .



はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞えやすいように+400Hz

<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>

2015年9月14日



太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne



"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

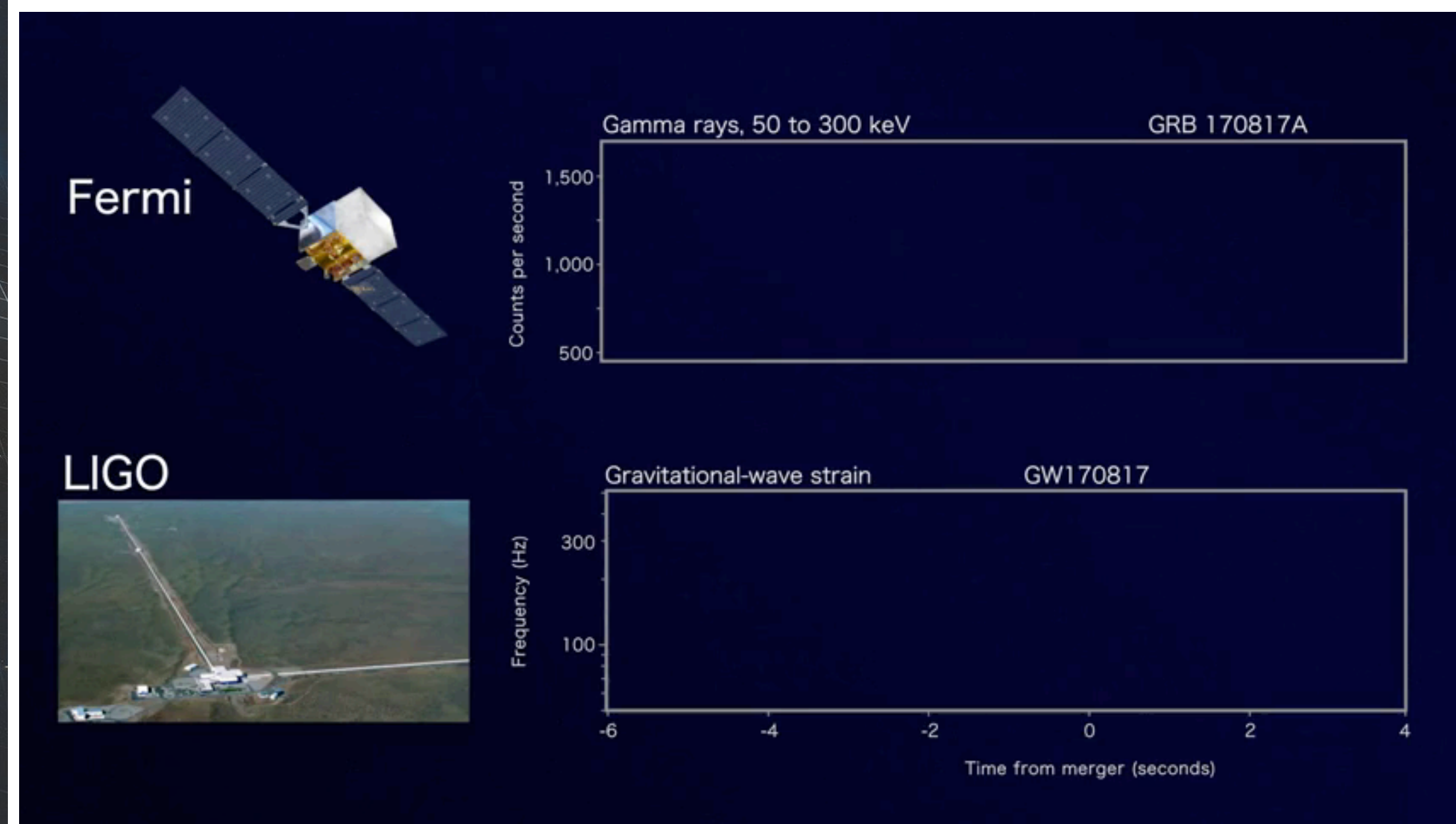
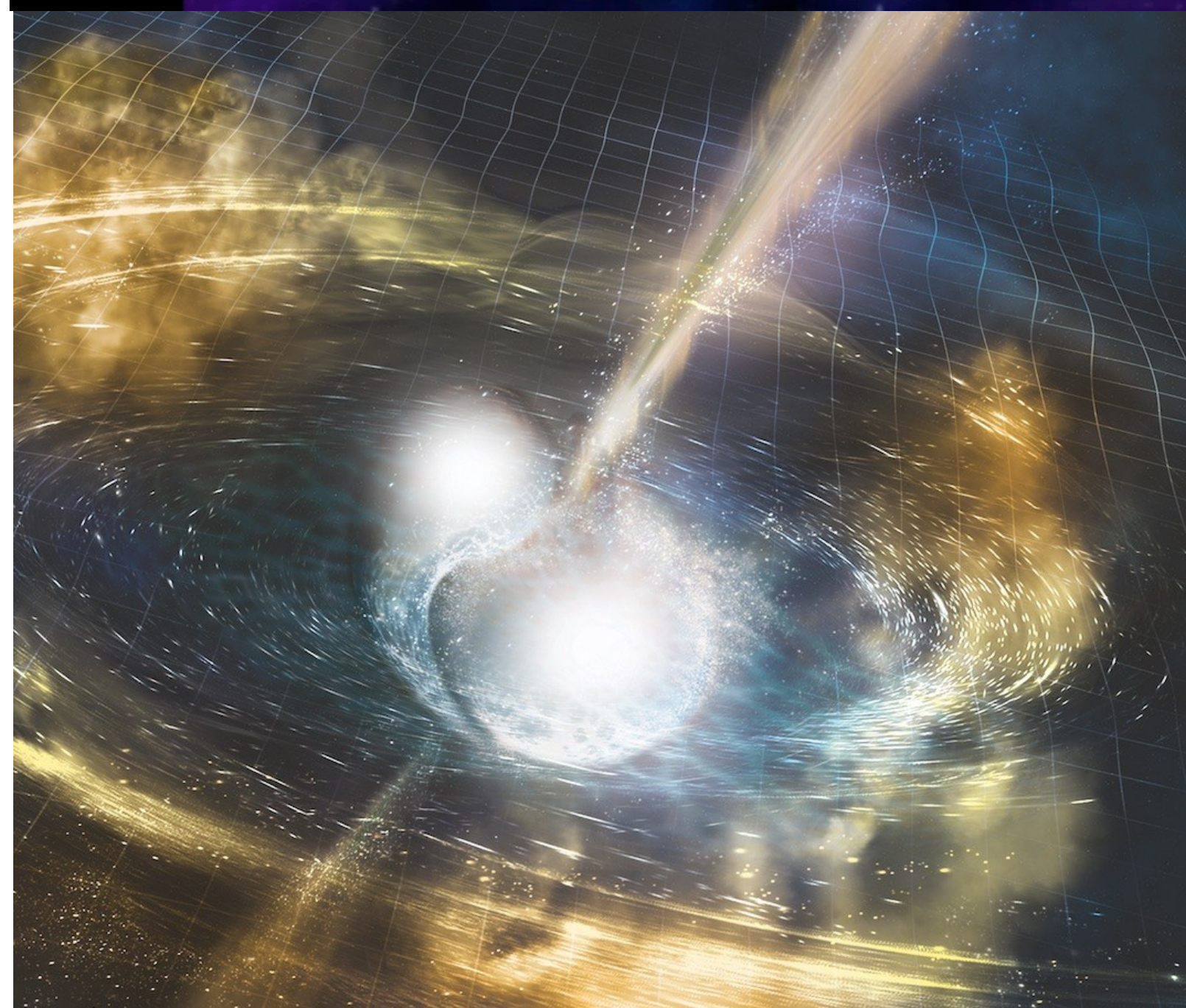
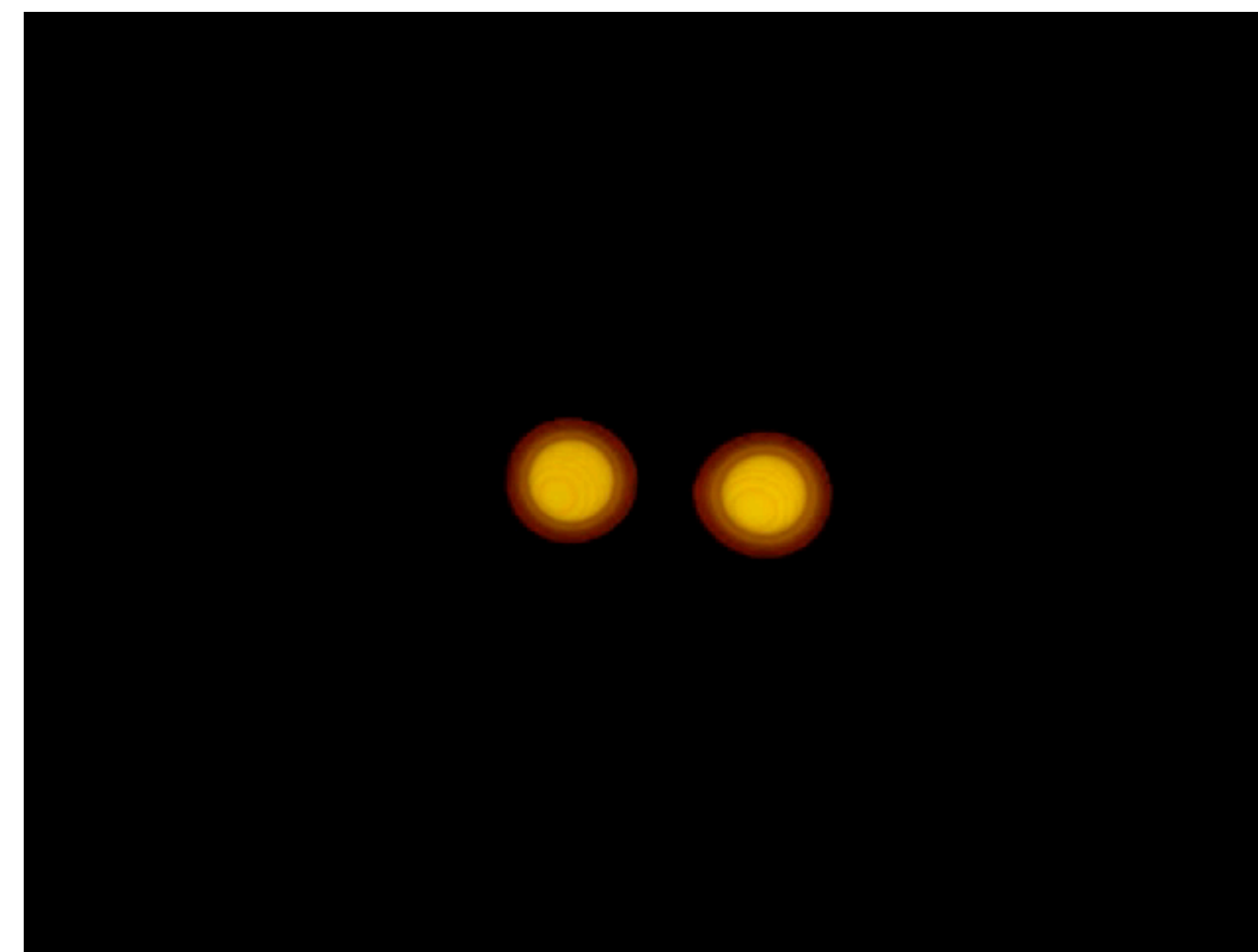
LIGO検出器への決定的な貢献と重力波の観測に対して

ライナー・ワイス(85)

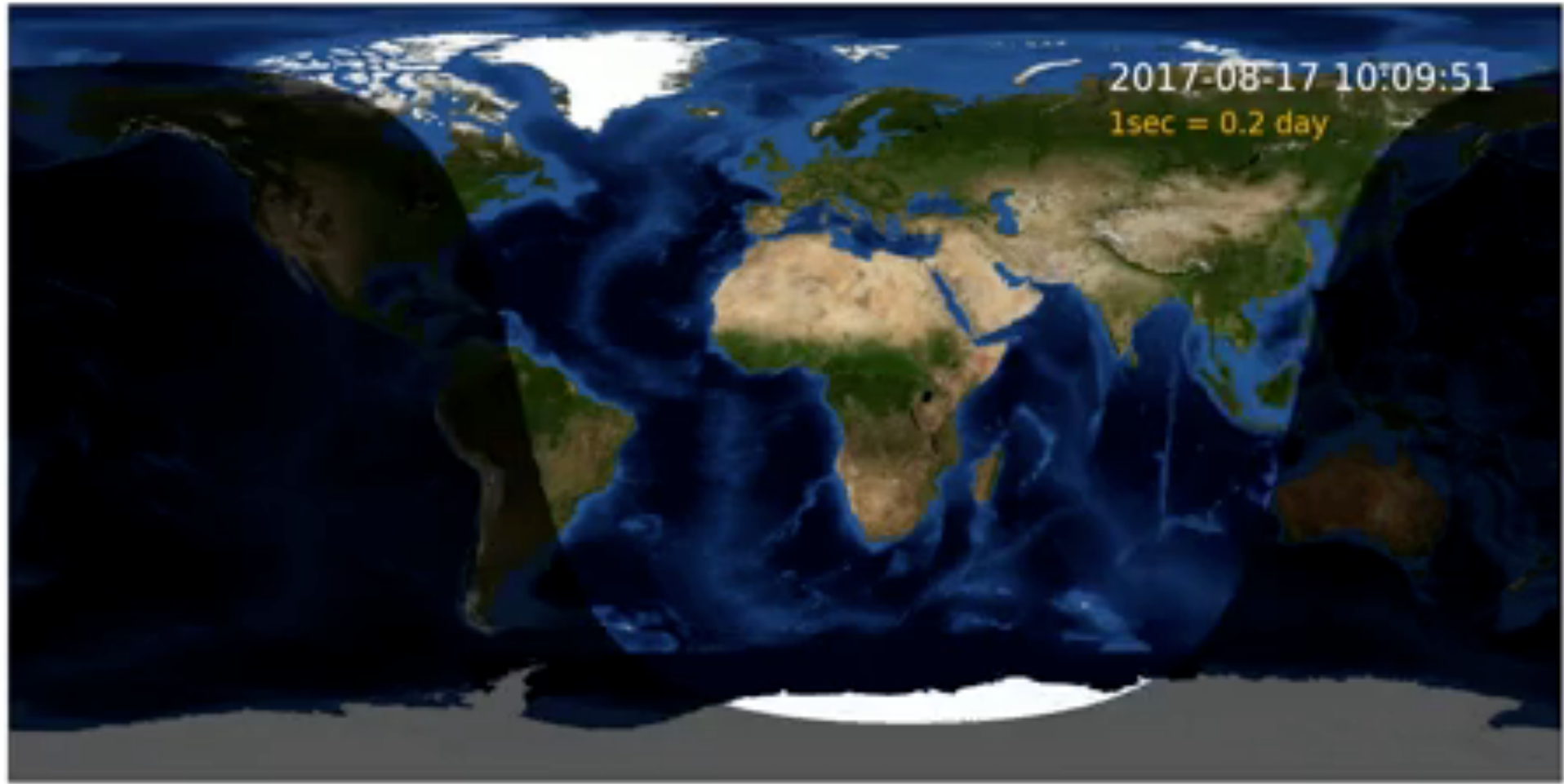
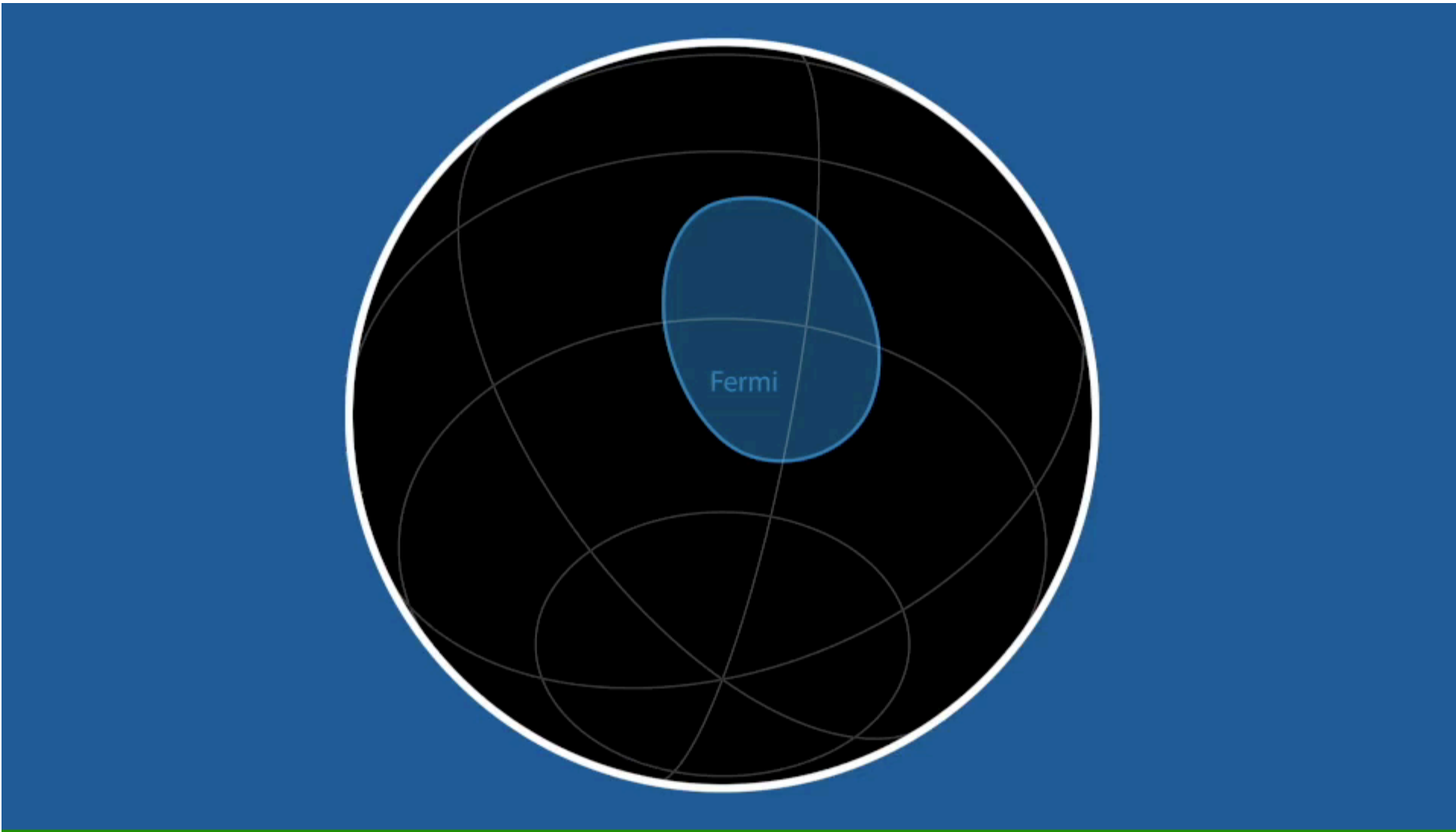
バリー・バリッシュ(77)

キップ・ソーン(77)

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測



波源はNGC4993
(40Mpc = 1 億3000万光年先)

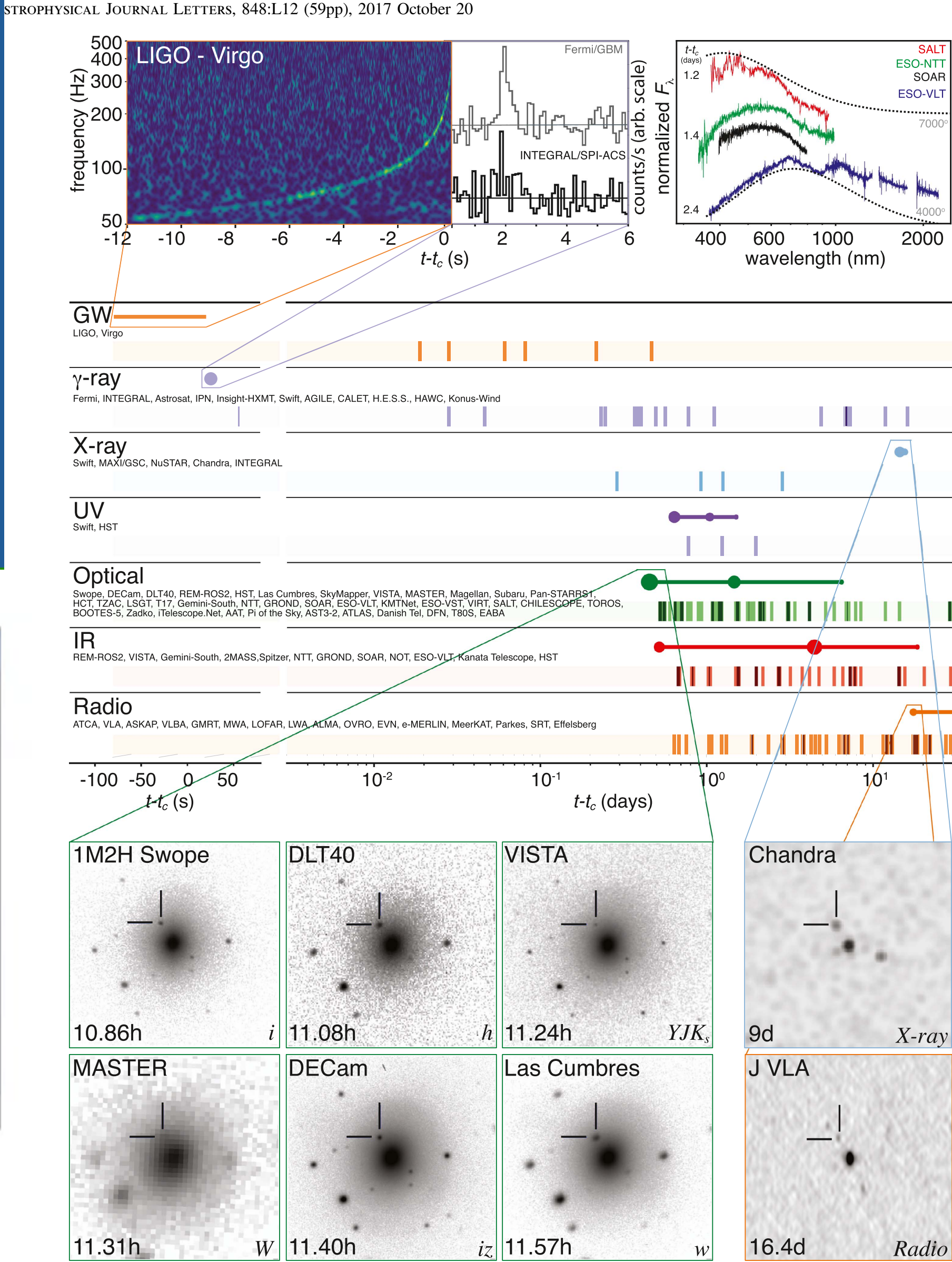
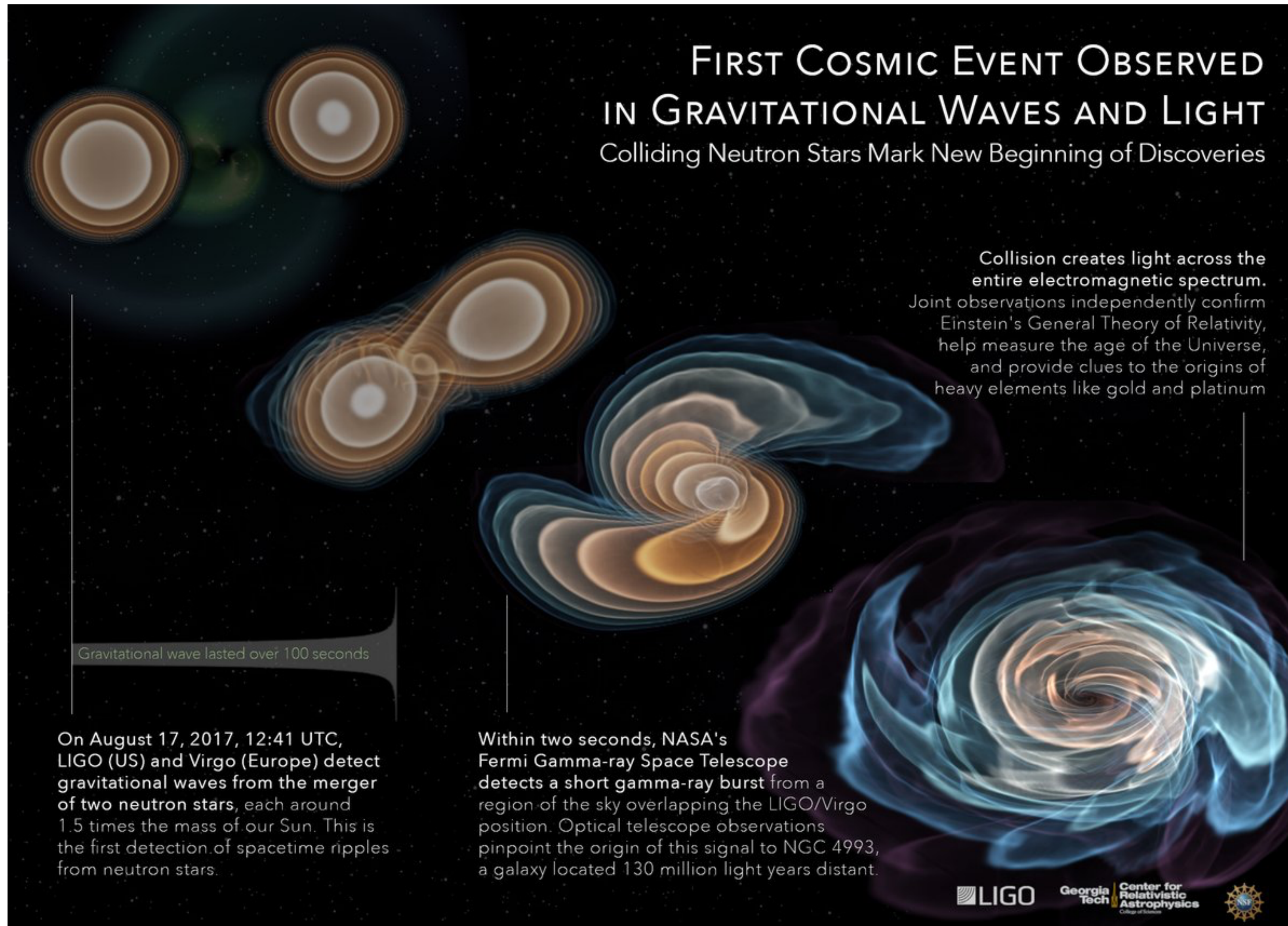
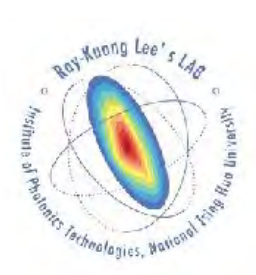


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent the times when information was reported in a GCN Circular. The names of the relevant instruments, facilities, or observing teams are collected at the beginning of the row. Second,

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測





Ruyi Life (如意) = BBH



In 2015, we detected the gravitational wave signal for the first time in our history, from two merged black holes. The spacetime wave trajectory generated coincided with the **S-shaped curve of "Ruyi"**. Coincidentally, in 2025, Artist Kang Muxiang utilizes steel cables as the medium, and through bending, stretching and interweaving, he transforms this universe pulse into a tangible sculpture, "Ruyi Life", giving a poetic visual interpretation of scientific phenomena.



Unveiling the Secrets of
Black Holes and
Gravitational Wave

極限

「ブラックホールと重力波」
台湾・日本全国巡回展

時空

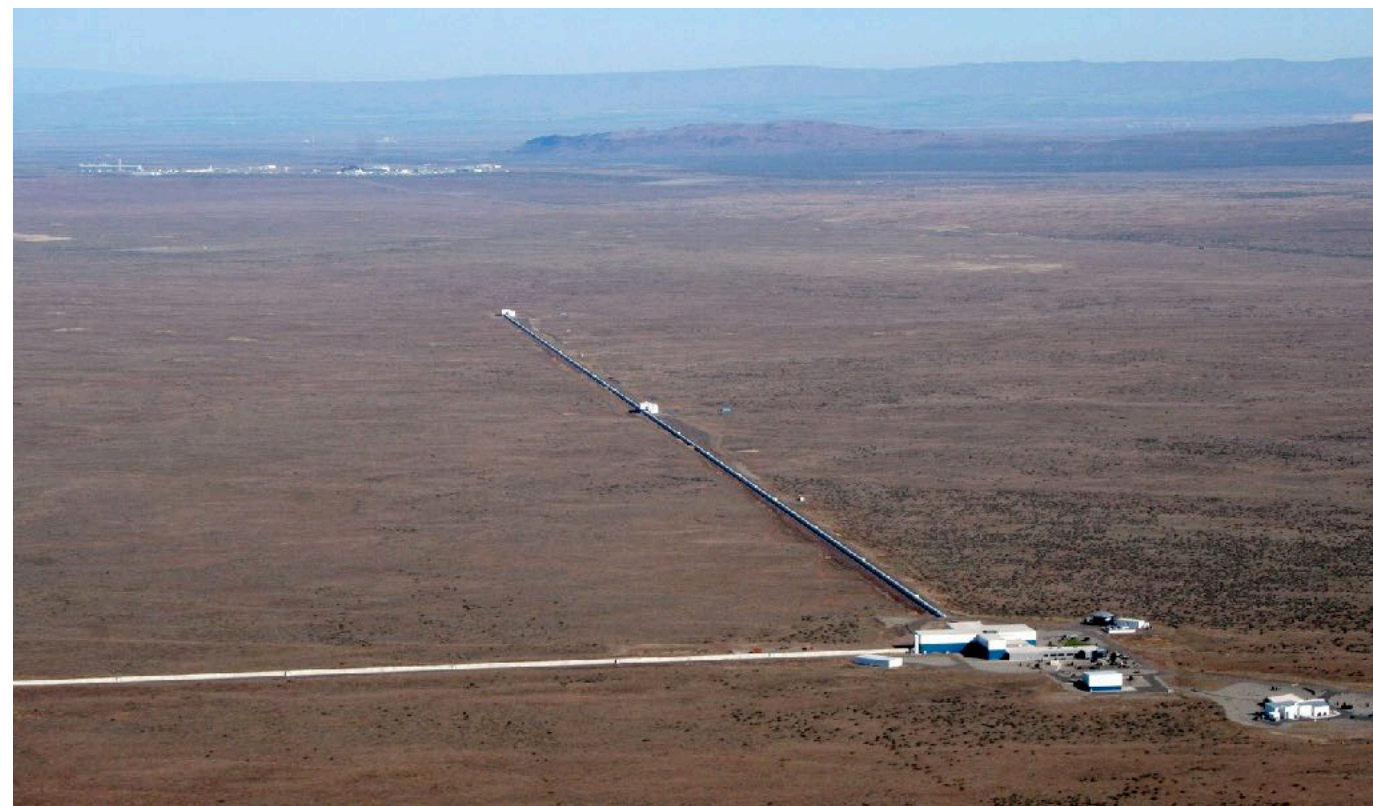
The Gravity Realm:

主催 | 「ブラックホールと重力波展」実行委員会
台湾: 國立自然科學博物館, 國立清華大學, 康木祥工作室
日本: 大阪工業大学, 東京大学宇宙線研究所KAGRA, 国立天文台ALMA

開催予定館 |
2025年7月19日~8月31日 大阪市立科学館, 2025年7月19日~9月7日 明石市立天文科学館, 2025年秋冬 富山市科学博物館
2026年冬 しまばら子ども宇宙科学館, 2028年 国立科学博物館, 未定 仙台市天文台, 名古屋市立科学館, 愛媛県総合科学博物館

世界の重力波天文台（レーザー干渉計）

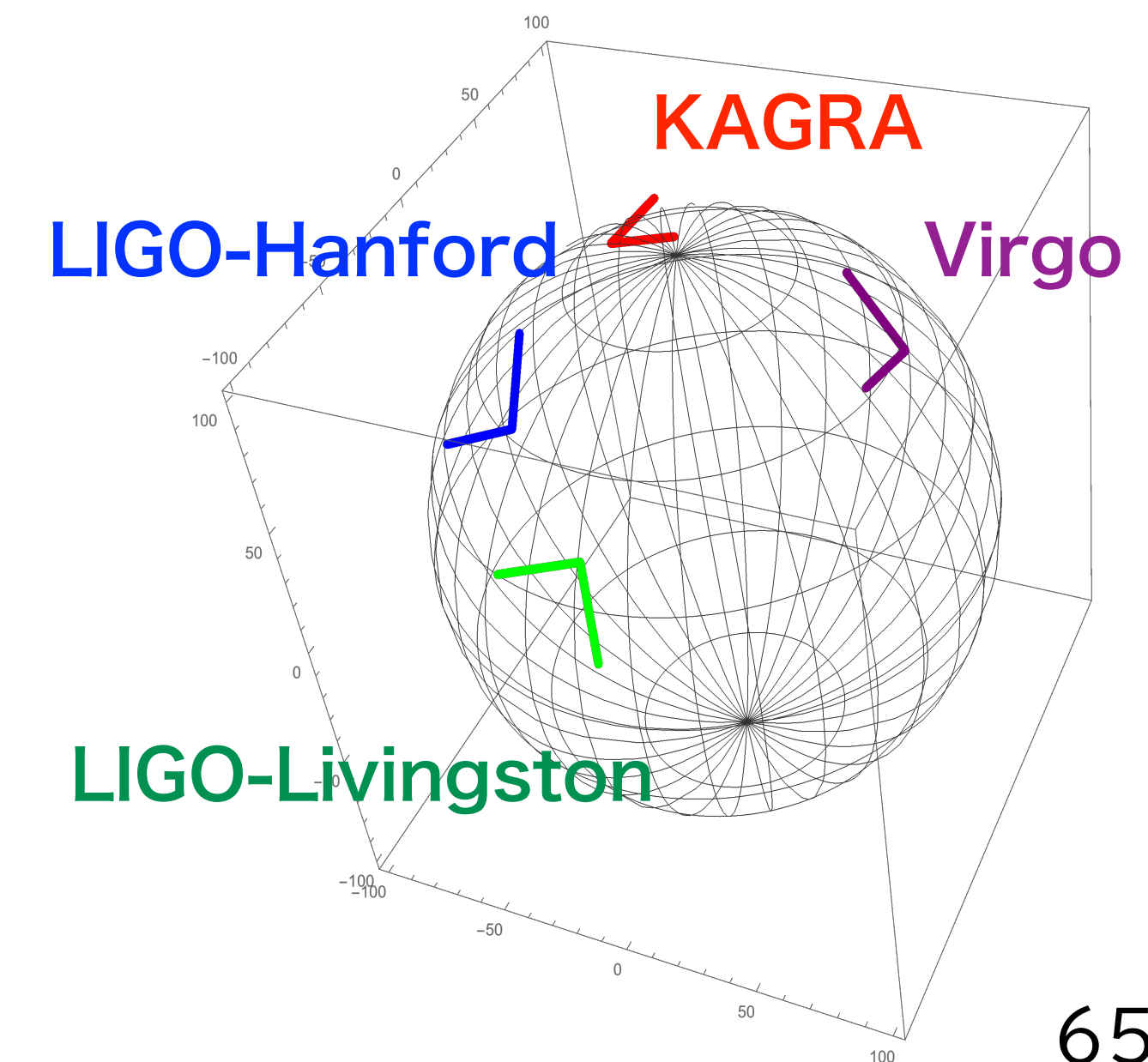
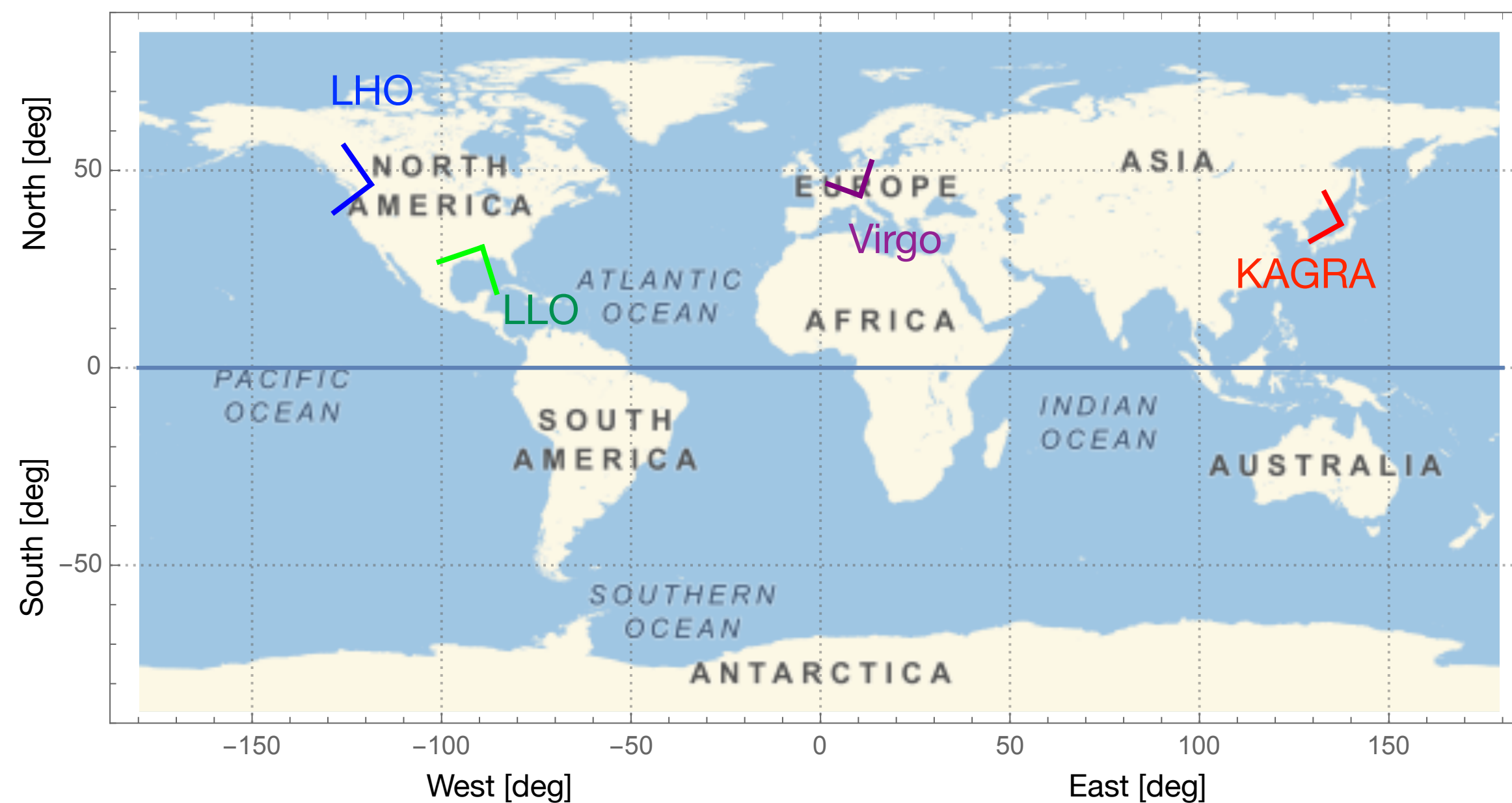
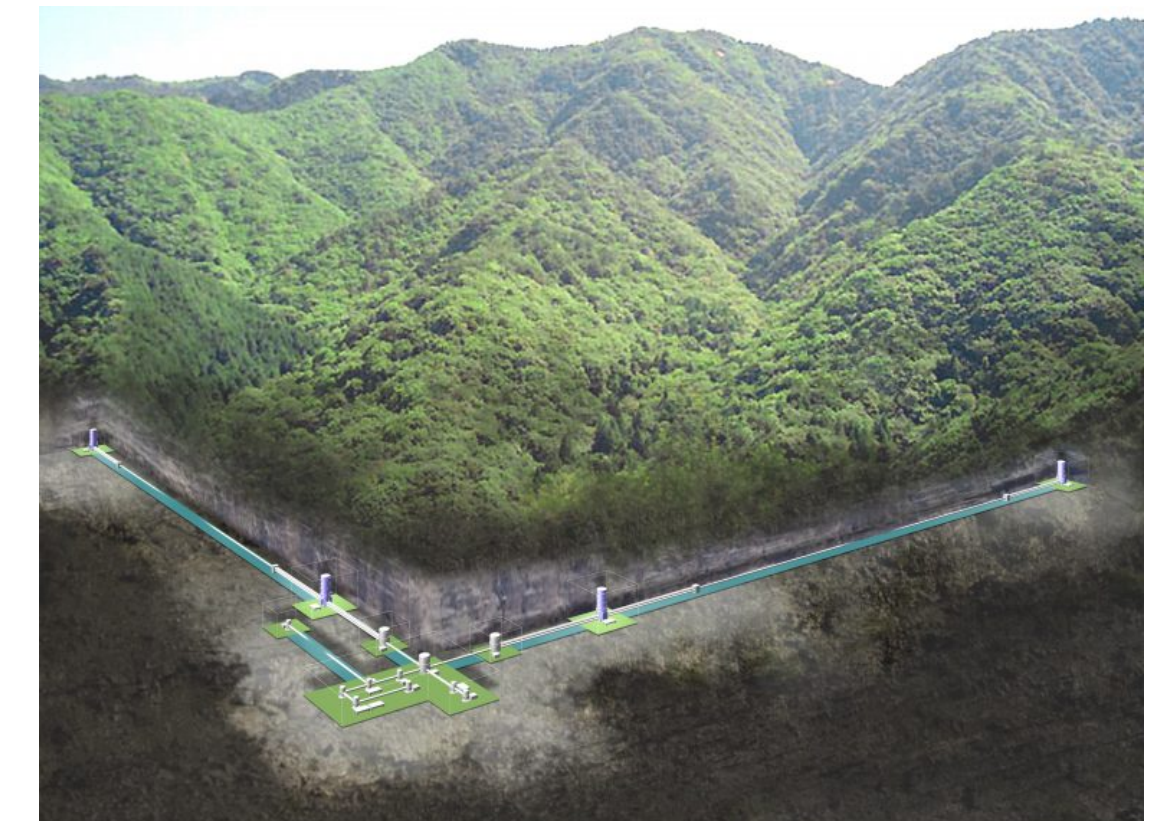
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



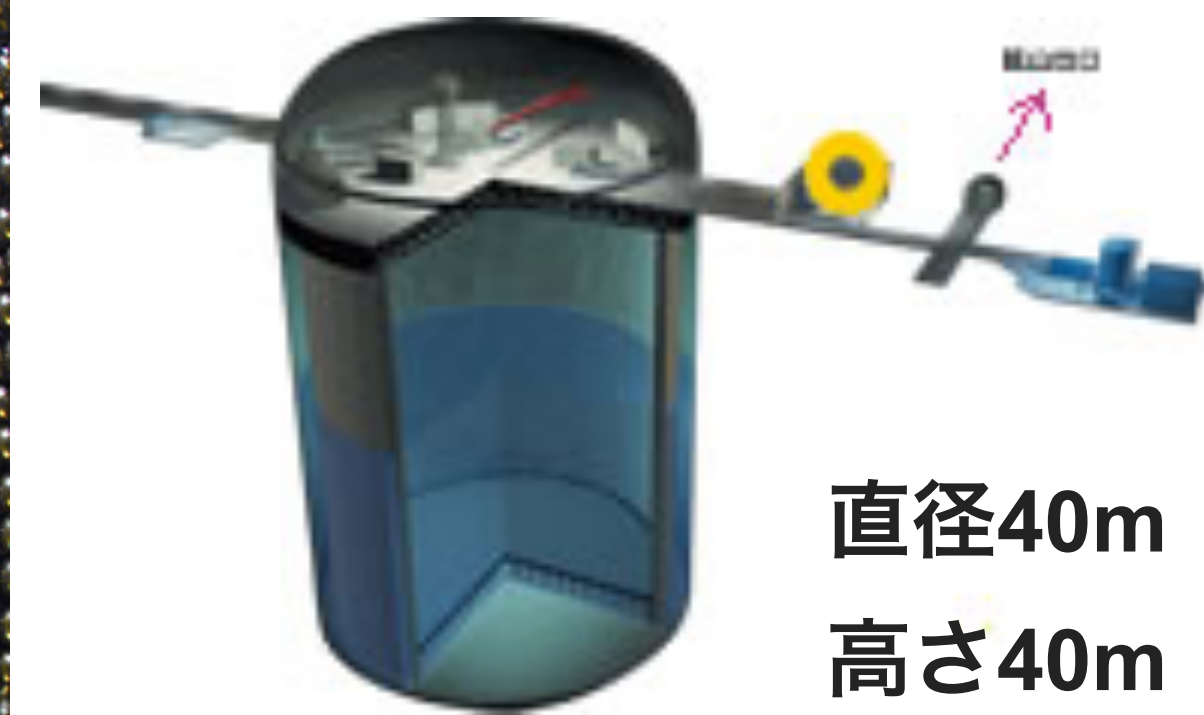
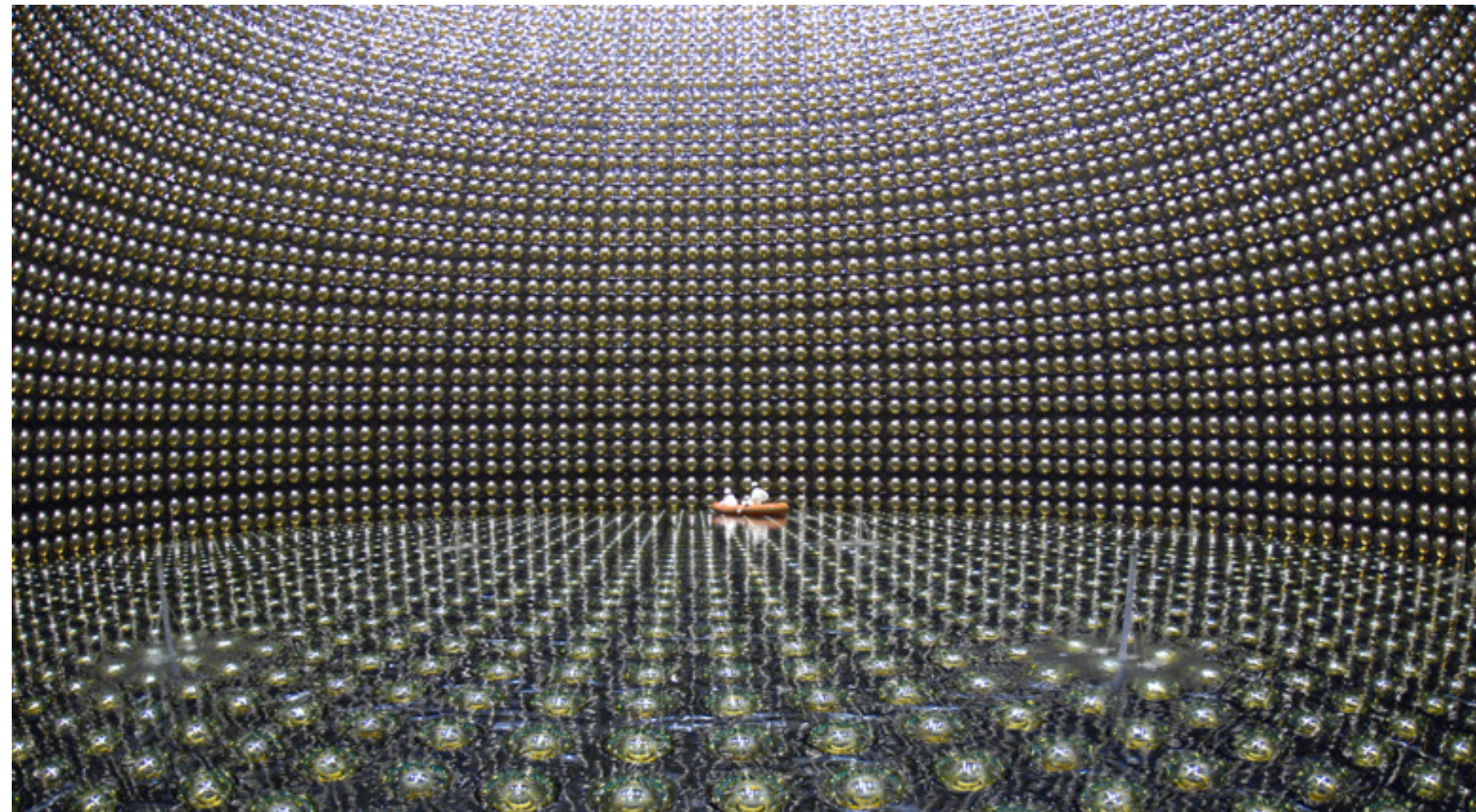
日本・KAGRA(岐阜・神岡)



スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>



直径40m

高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり、
宇宙から飛来するニュートリノを観測する。



ノーベル物理学賞を受賞

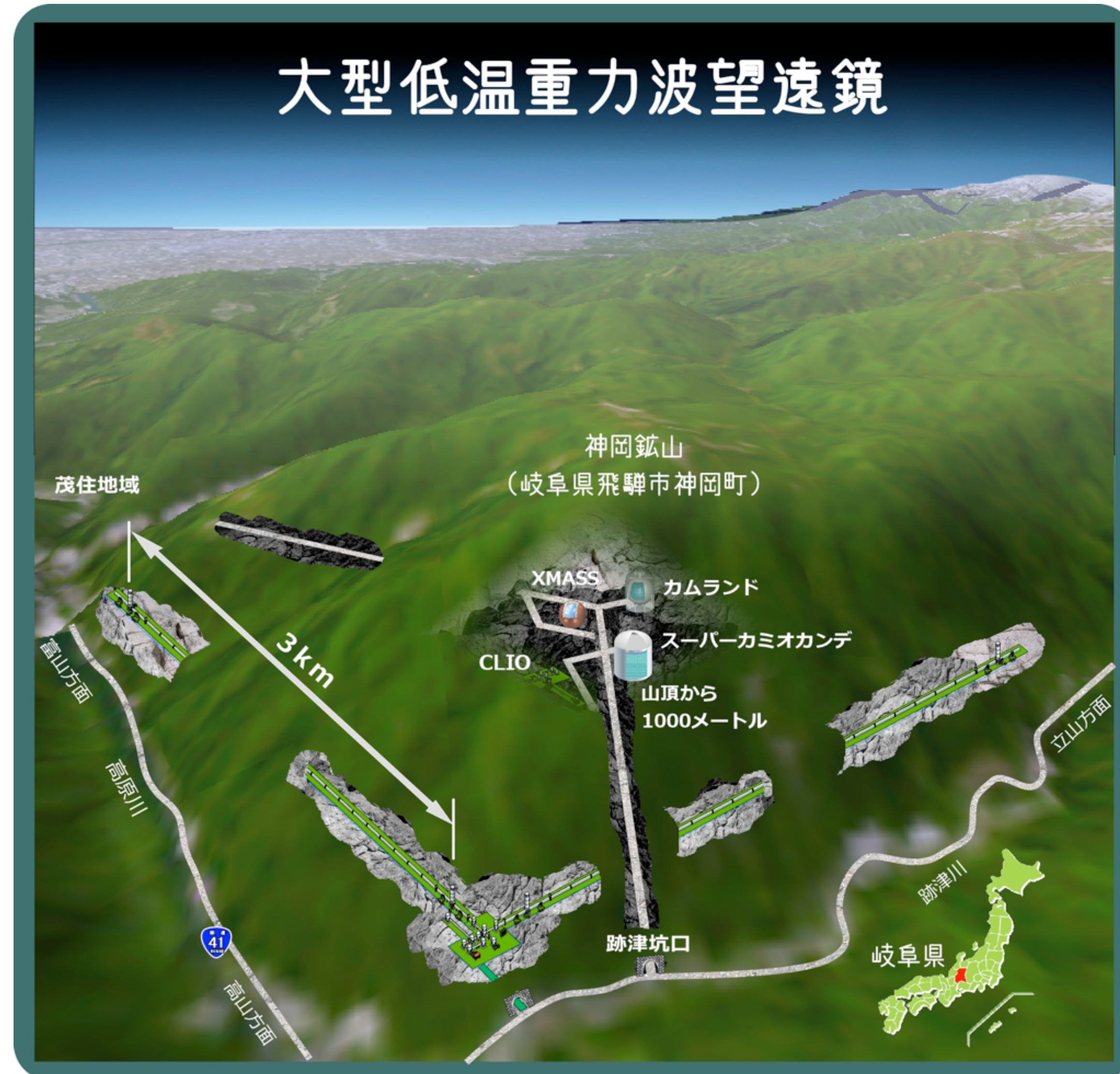
小柴昌俊 (2002年)

梶田隆章 (2015年)



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational-Wave Observatory, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

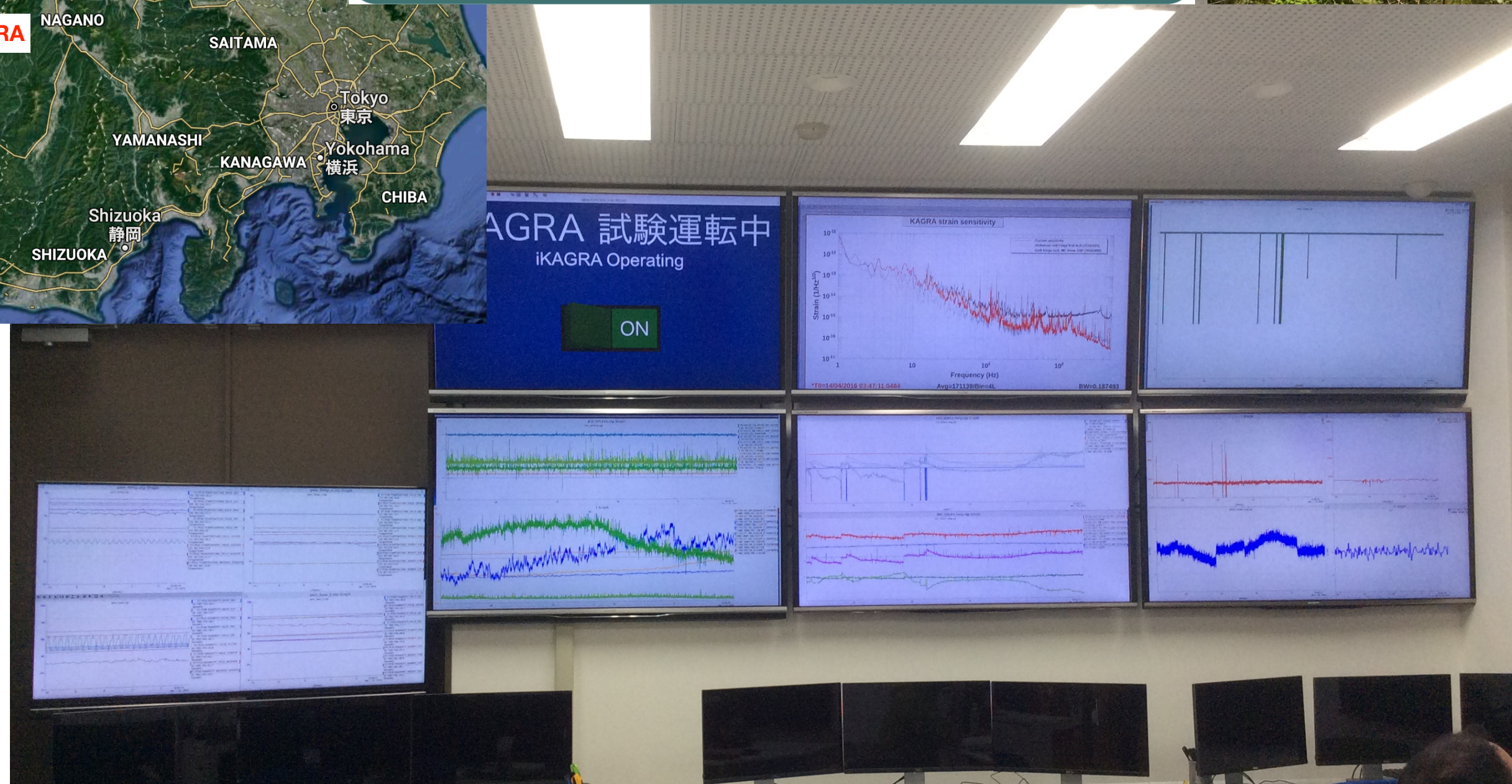
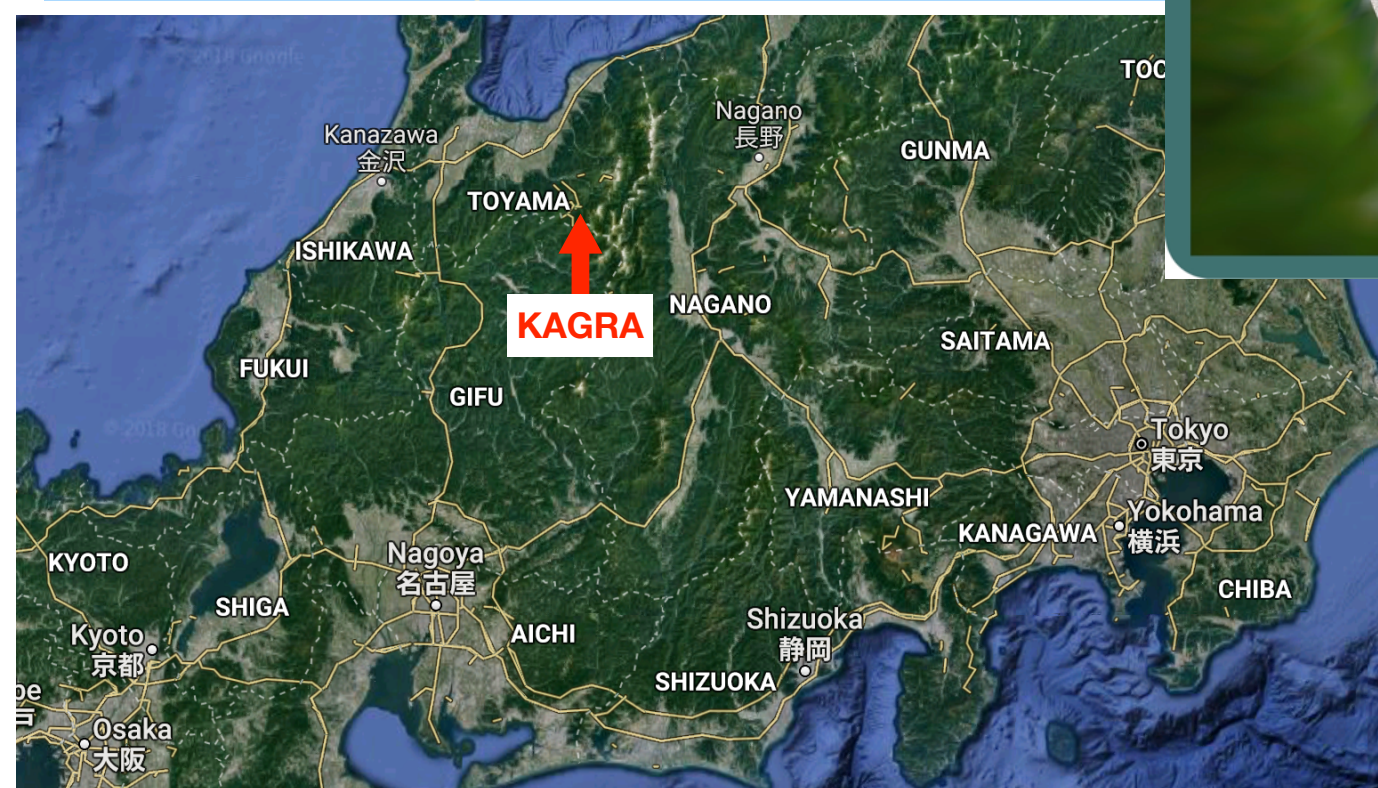
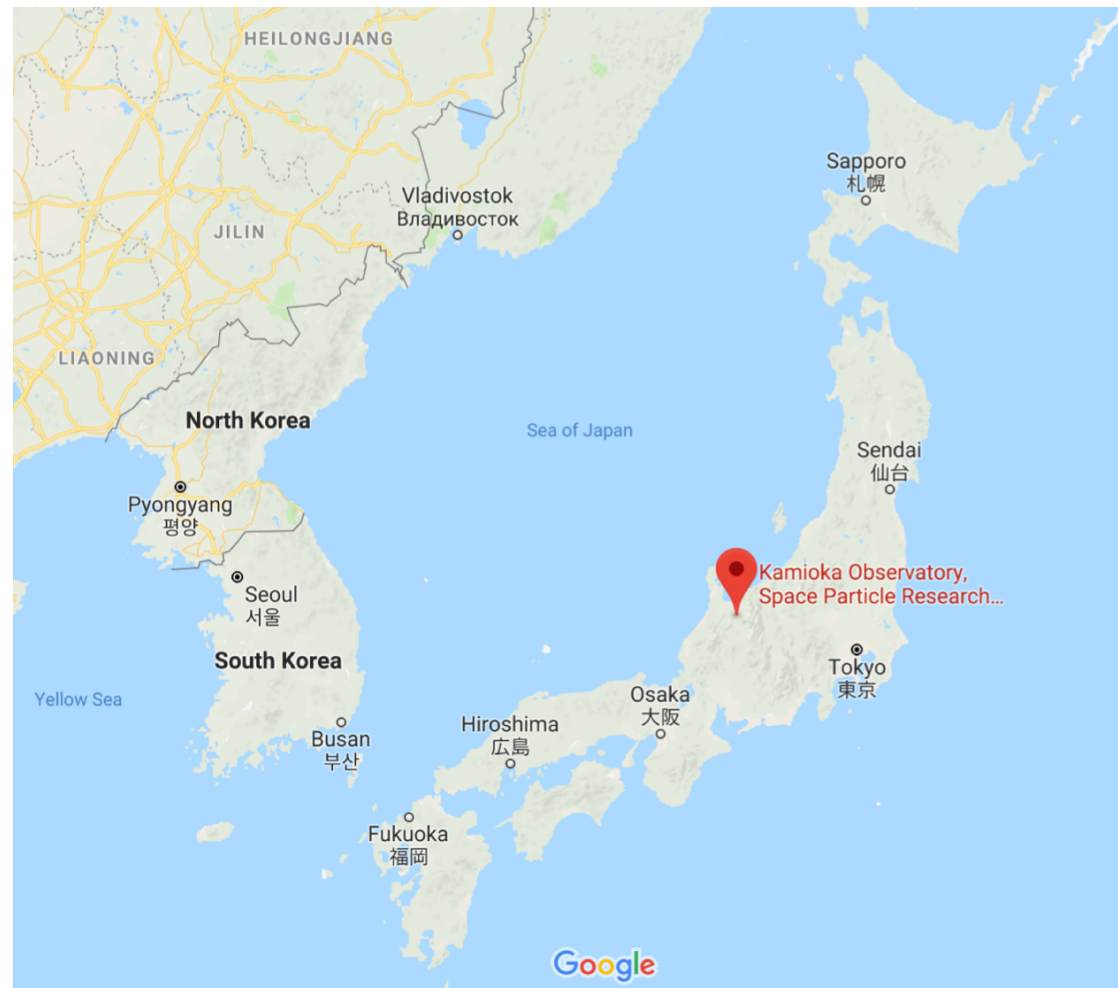
熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア

光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/history>

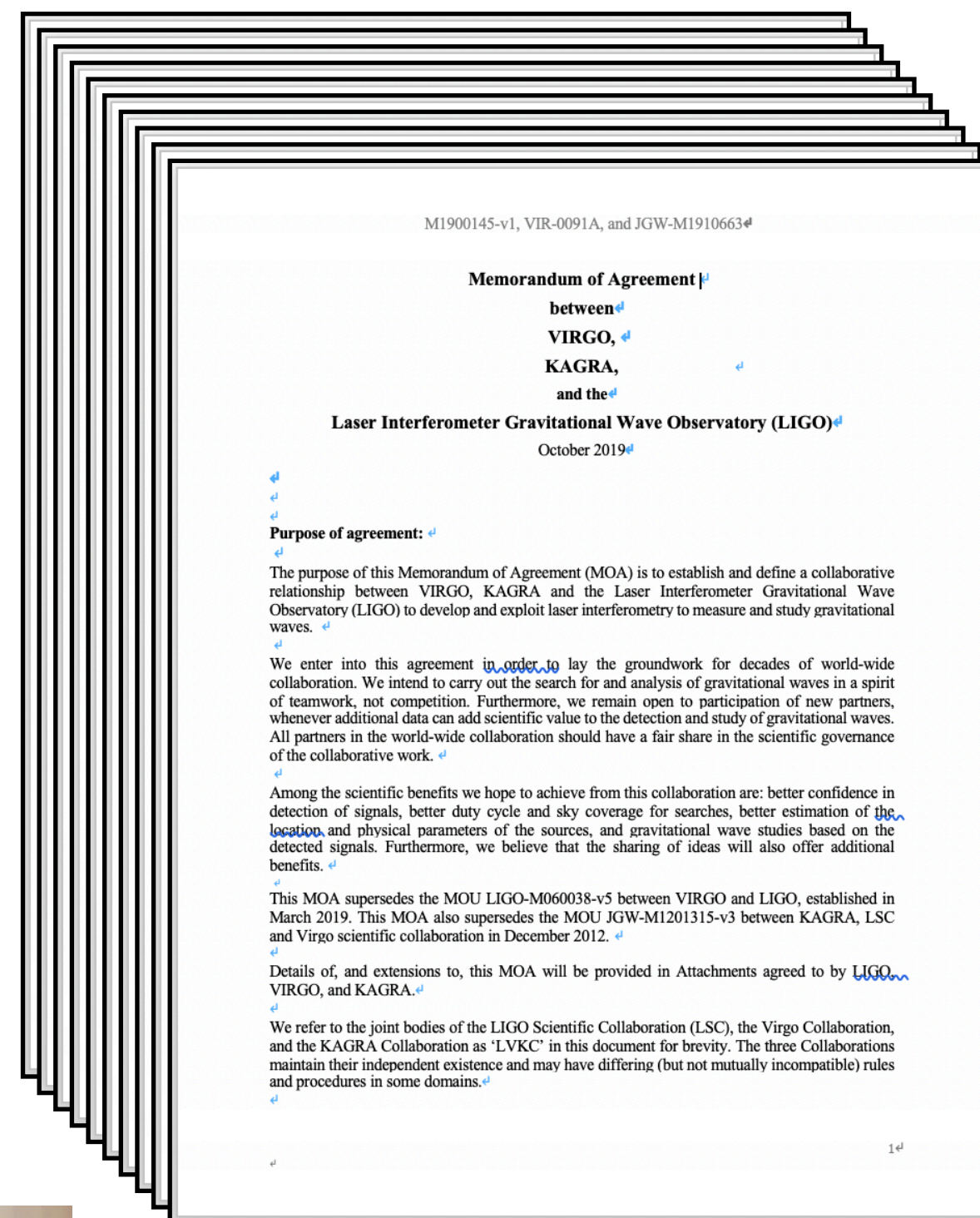
KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



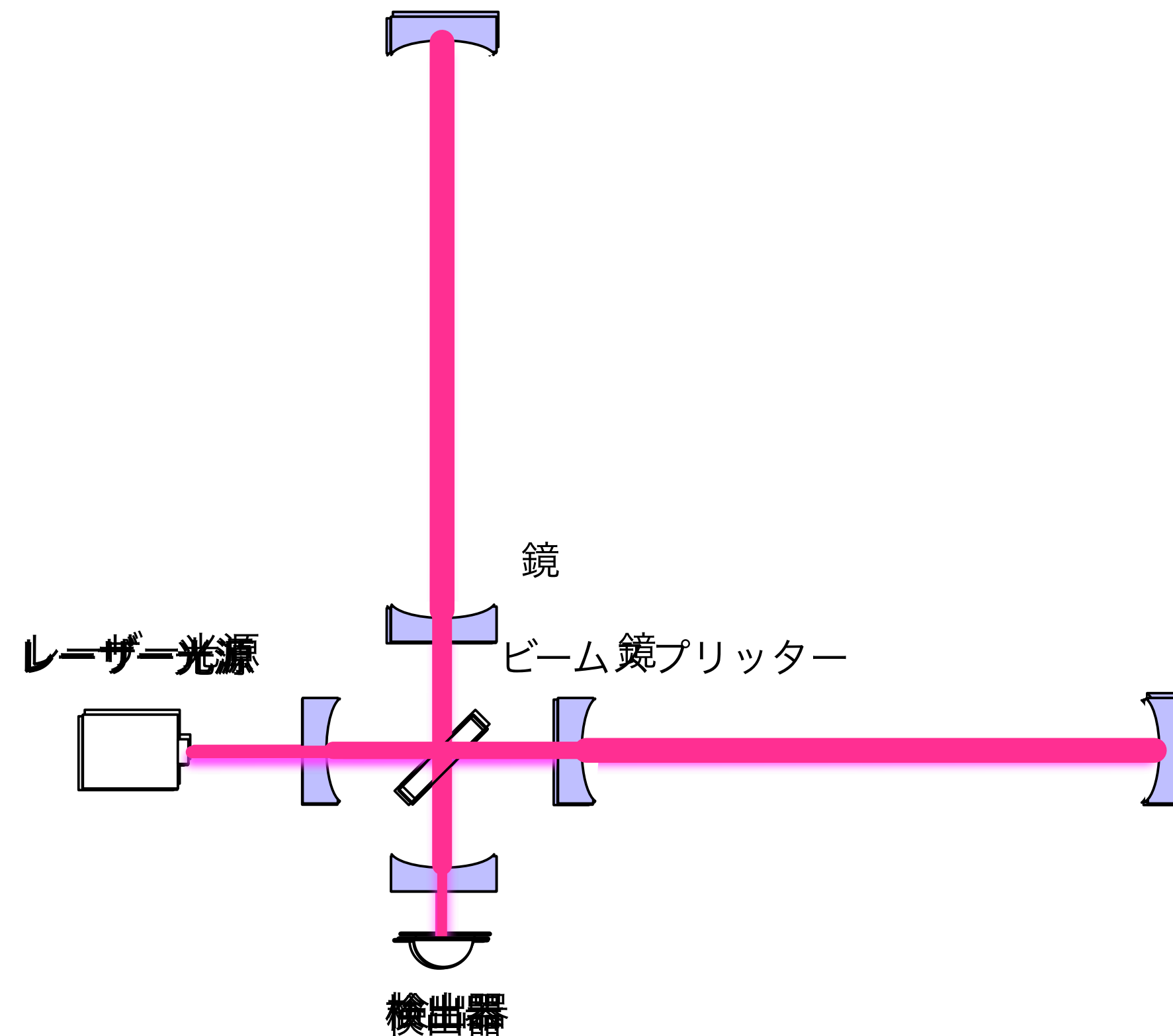
KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月，アメリカ・ヨーロッパとの
研究協定に調印



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡) 干渉計の工夫



長い腕が欲しい. 750km位の長さ

▶ 300回往復させよう

強いレーザーが欲しい.

▶ 100回共鳴させよう

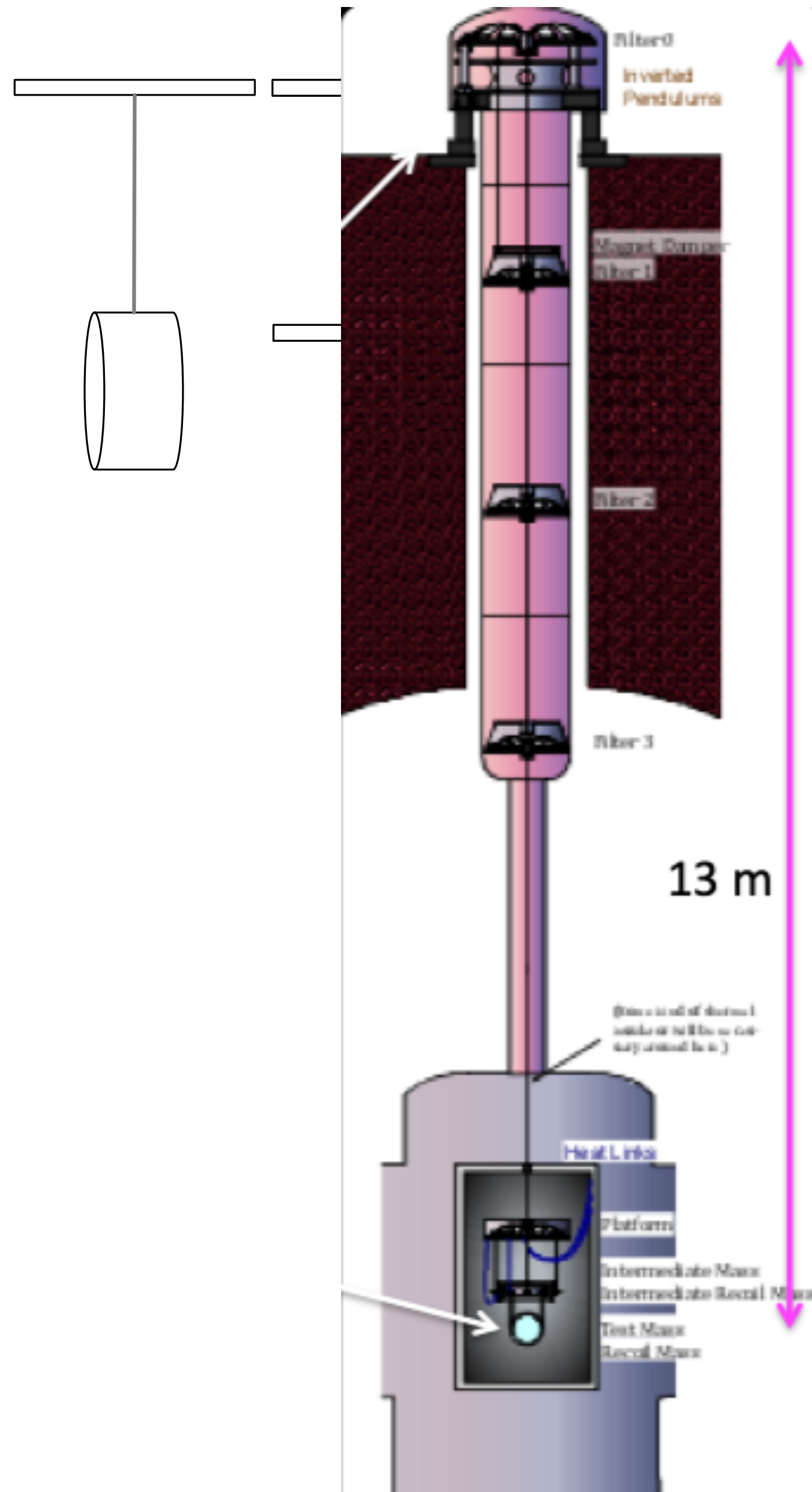
信号がまだ弱い

▶ 信号も共鳴させよう

レーザーがまだ弱い

▶ 強いレーザーを開発

KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡) 干渉計の工夫



鏡が地面振動で揺れたら困る

▶ 吊り下げよう

高周波振動抑えたい

▶ 2段にしよう

▶ 3段にしよう

▶ 4段にしよう

低周波振動抑えたい

▶ ひもを長くしよう

高さ13.5m

トンネルの2層目から吊り下げる

KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡) 干渉計の工夫



鏡が熱振動で揺れたら困る

▶ 温度を下げよう
20K (マイナス250度)

低温度で耐えられる素材は？

▶ 人工サファイア

22.8 kg
diameter 22cm
thickness 15cm

低温にする装置は？

対流 x
放射 x
伝導 ○

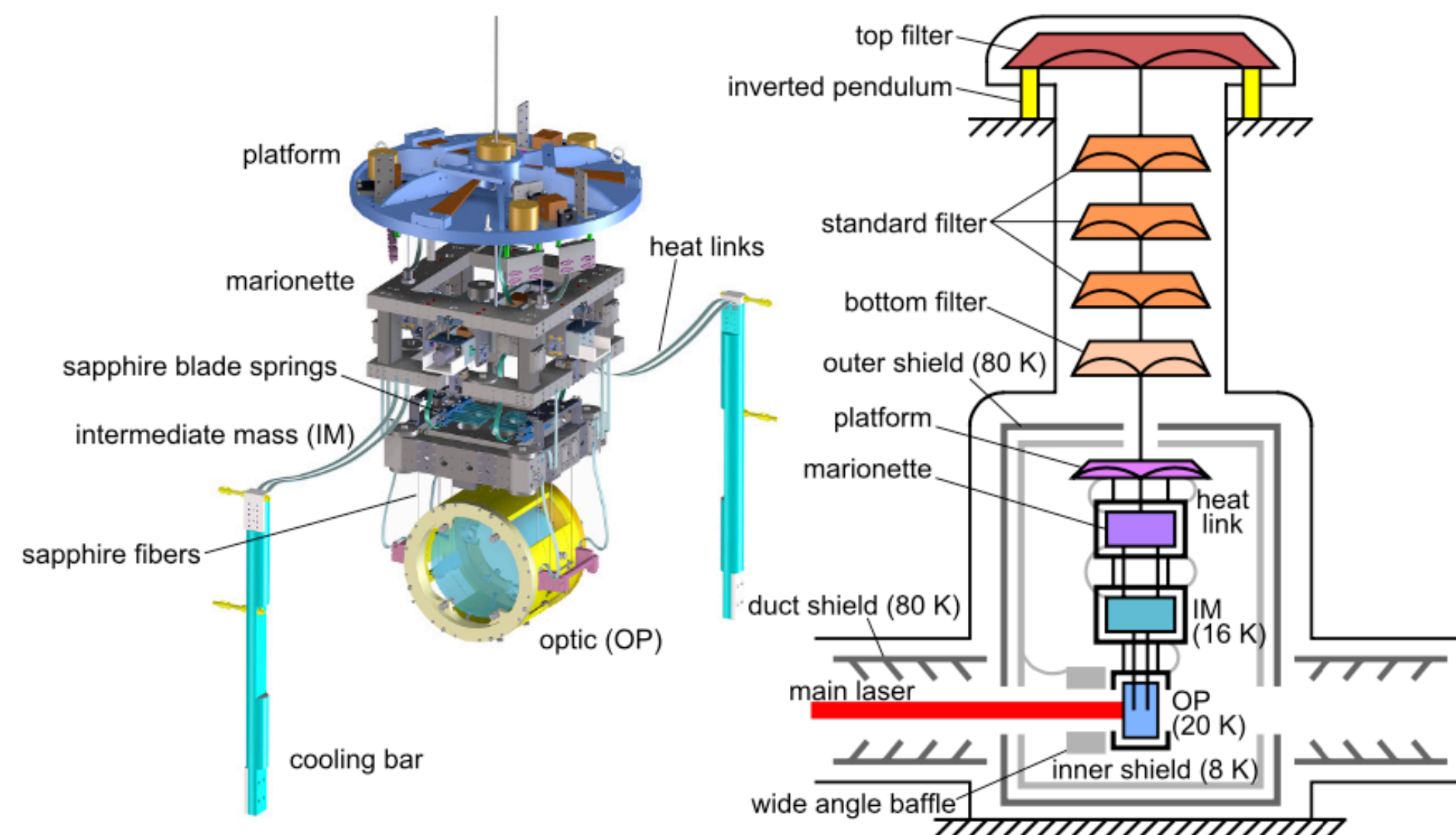
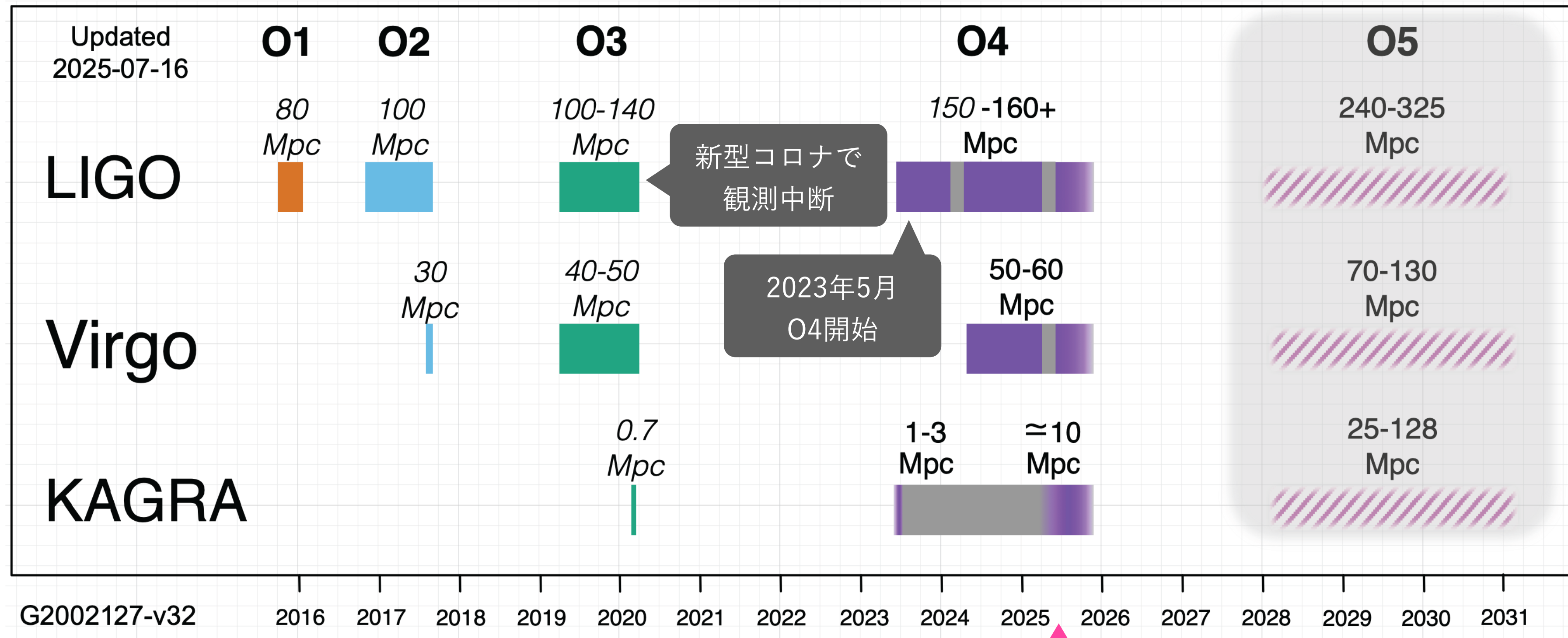


Figure 3. The CAD drawing of the cryogenic payload under Type-A (left) and the schematic of the cryogenic suspension system of sapphire test masses (right). Suspension stages outside of the outer shield are at room temperature.

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4)



重力波のデータカタログ公開
Gravitational Wave Transient Catalog



GWTC-1
2018/12/3

GWTC-2
2020/10/28

GWTC-2.1
2021/8/2

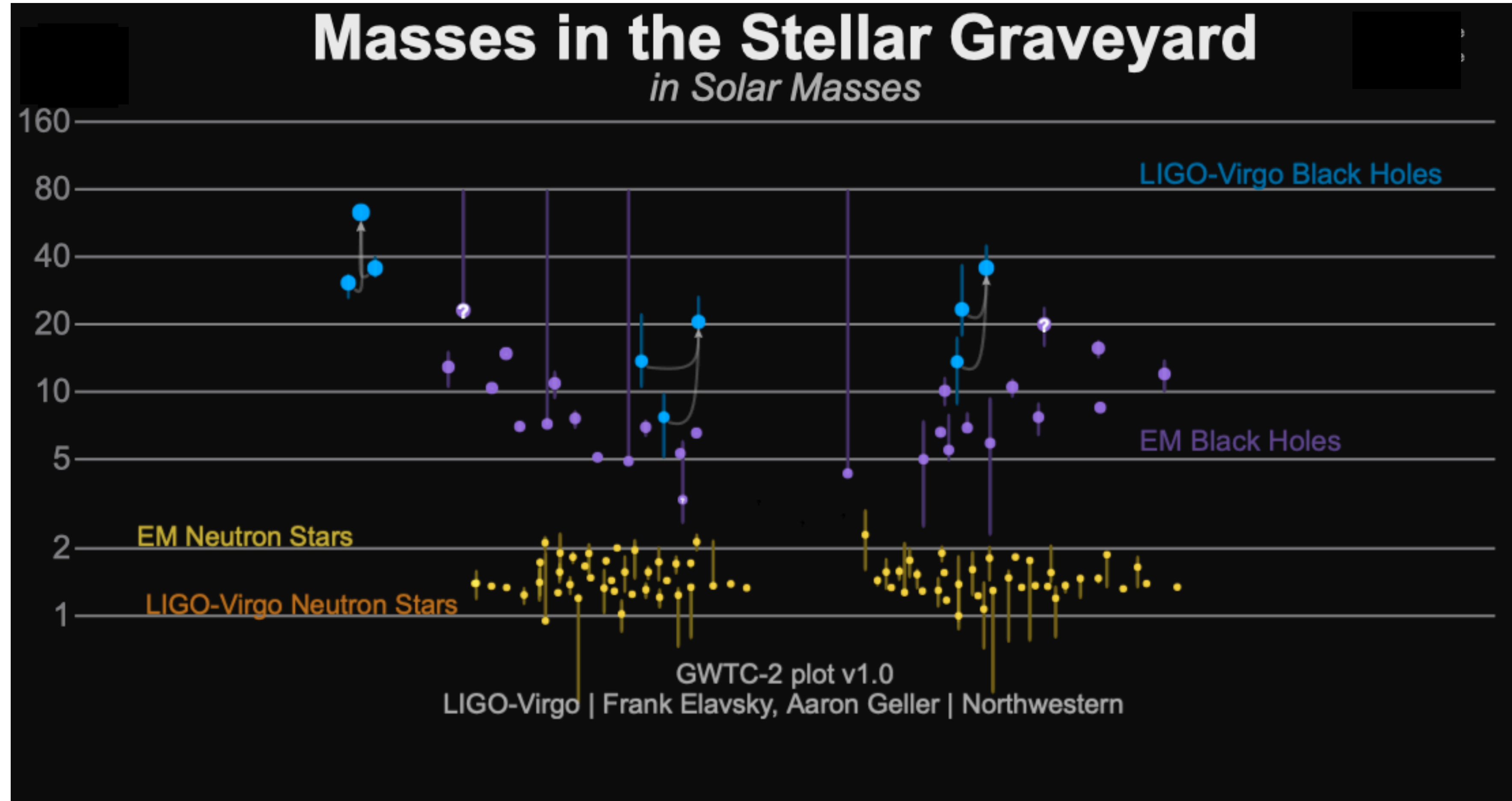
GWTC-3
2021/11/5

GWTC-4
2025/8/26

Today

<https://observing.docs.ligo.org/plan/>

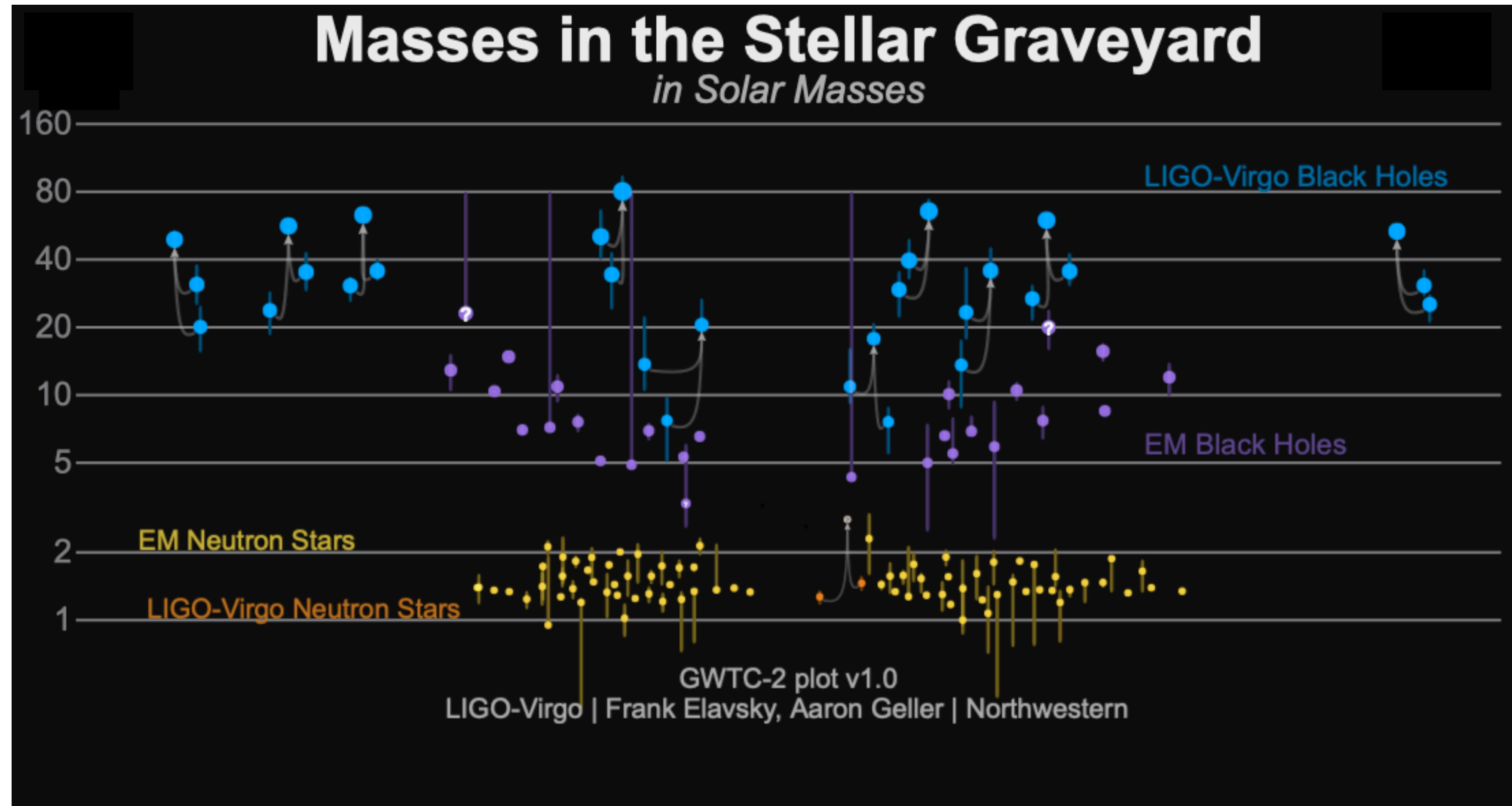
O1 (2015/9/12 - 2016/1/19)



3 BHBH

GW150914: the first ever detection of gravitational waves from the merger of two black holes more than a billion light years away

<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

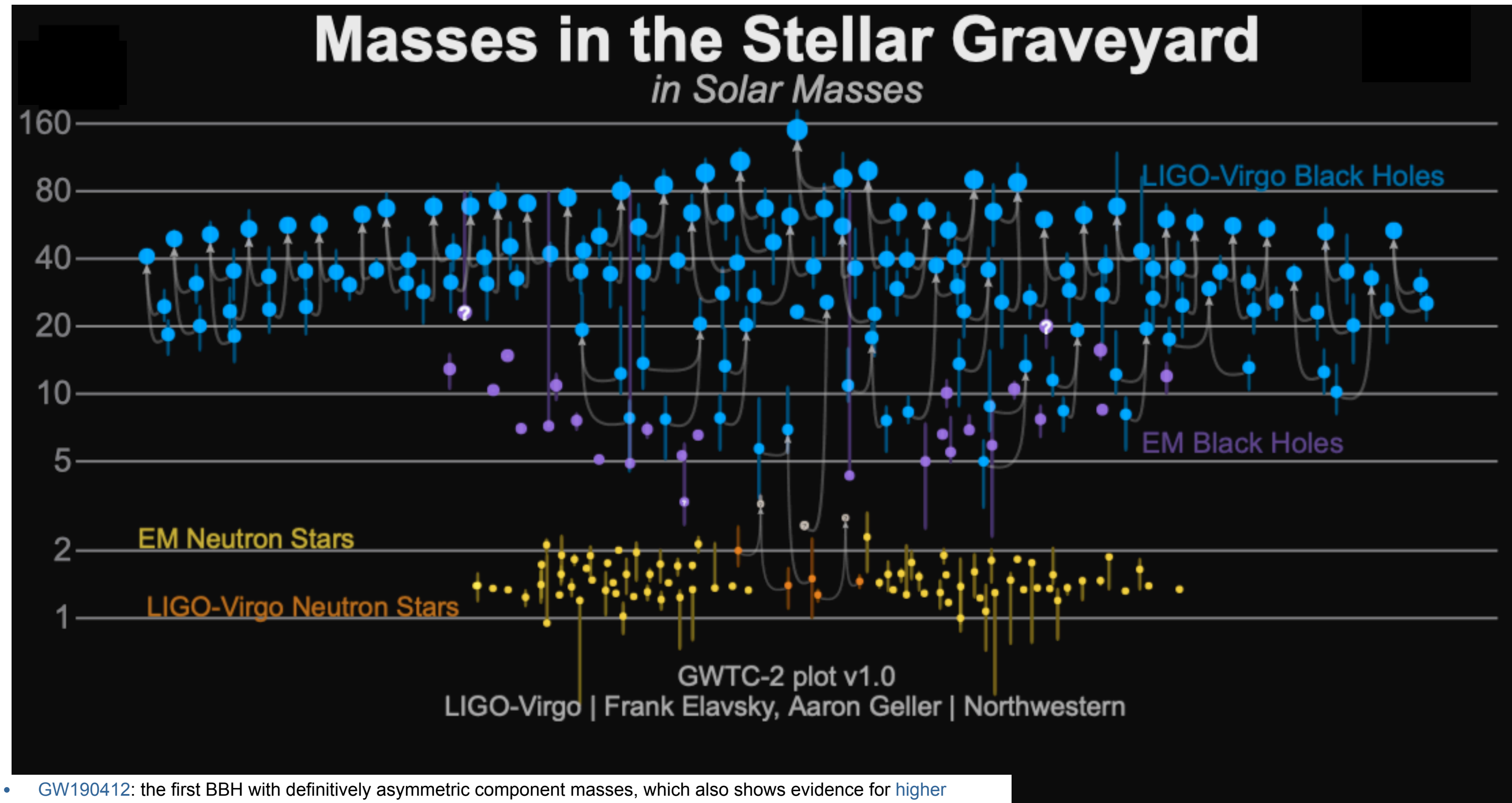


- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic spectrum.

<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

10 BHBH

1 NSNS



- [GW190412](#): the first BBH with definitively asymmetric component masses, which also shows evidence for [higher harmonics](#)
- [GW190425](#): the second gravitational-wave event consistent with a BNS, following [GW170817](#)
- GW190426_152155: a low-mass event consistent with either an NSBH or BBH
- GW190514_065416: a BBH with the smallest effective aligned spin of all O3a events
- GW190517_055101: a BBH with the largest effective aligned spin of all O3a events
- [GW190521](#): a BBH with total mass over 150 times the mass of the Sun
- [GW190814](#): a highly asymmetric system of ambiguous nature, corresponding to the merger of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object, making the latter either the lightest black hole or heaviest neutron star observed in a compact binary
- GW190924_021846: likely the lowest-mass BBH, with both black holes exceeding 3 solar masses

46 BHBH

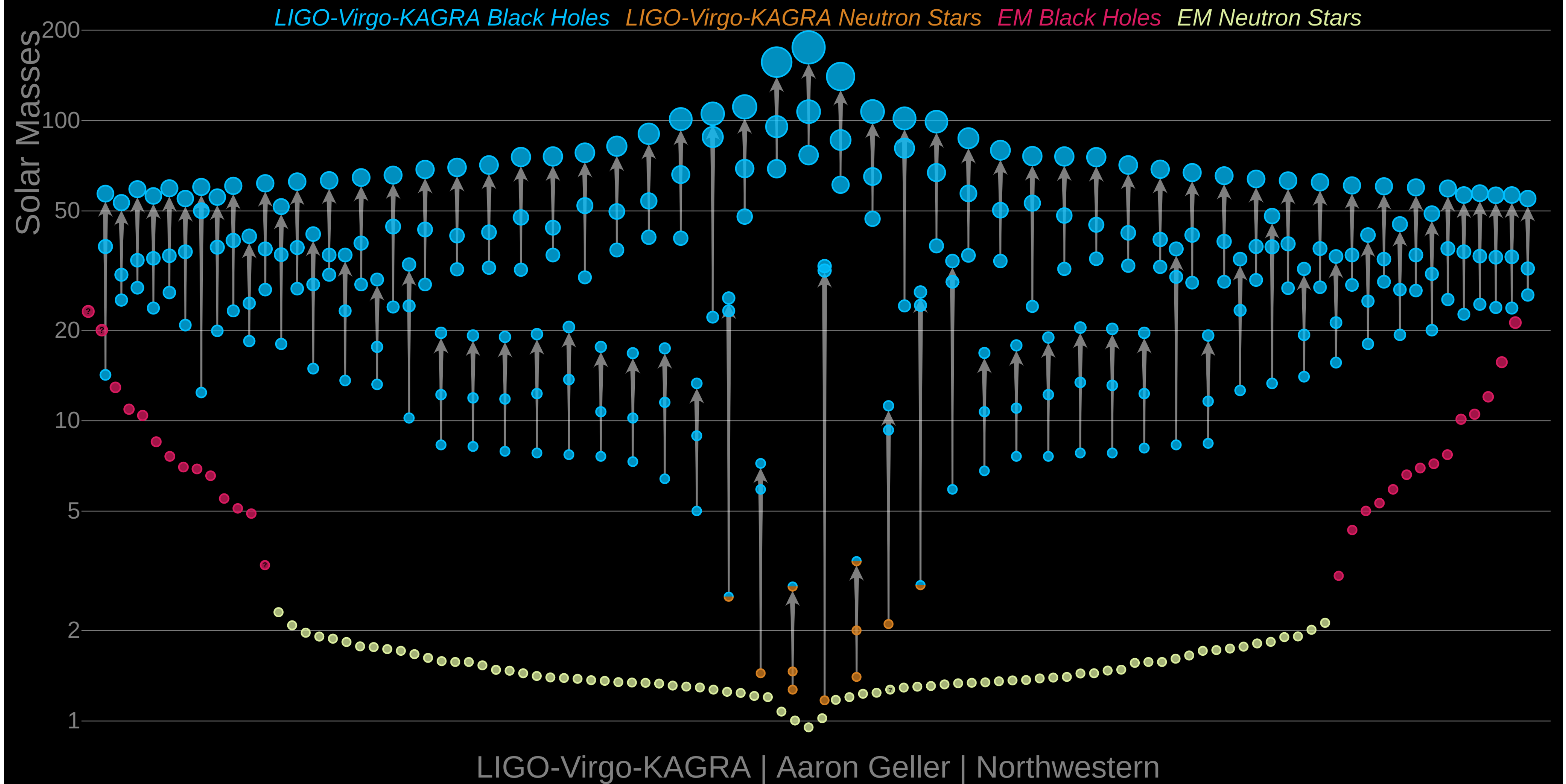
2 NSNS

2 BH+?

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

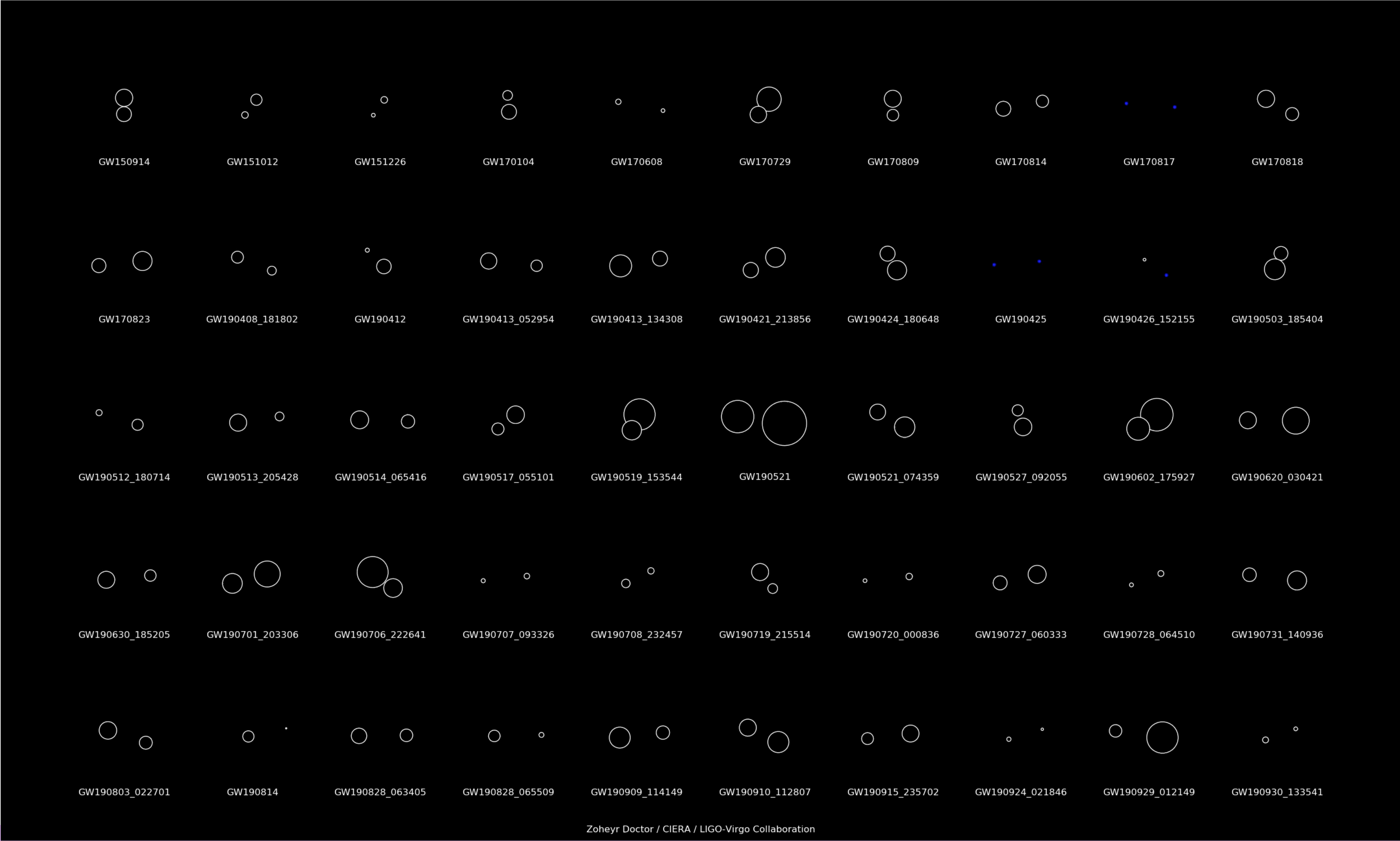
After O3b:GWTC3 (2021/11/7 released)

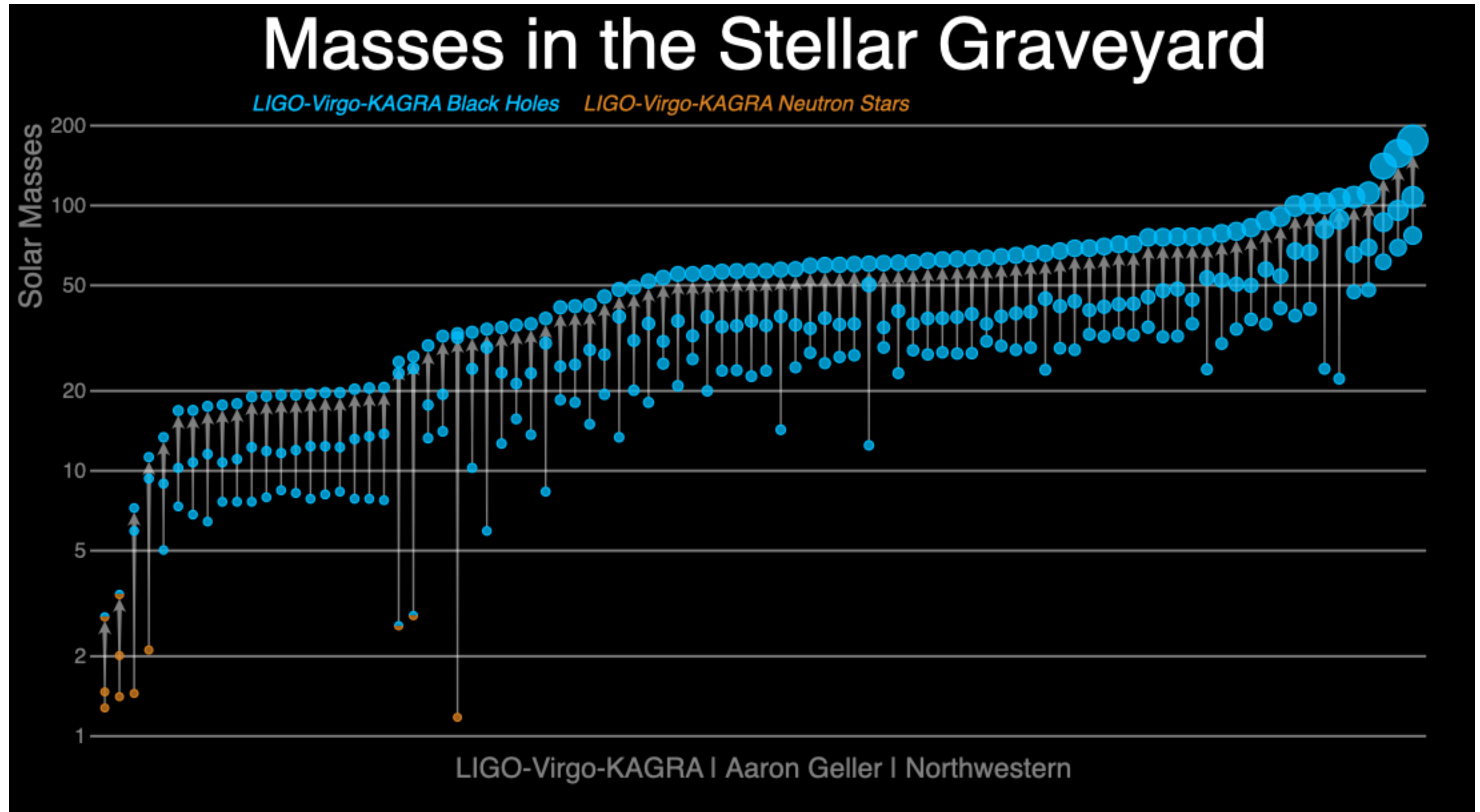
Masses in the Stellar Graveyard



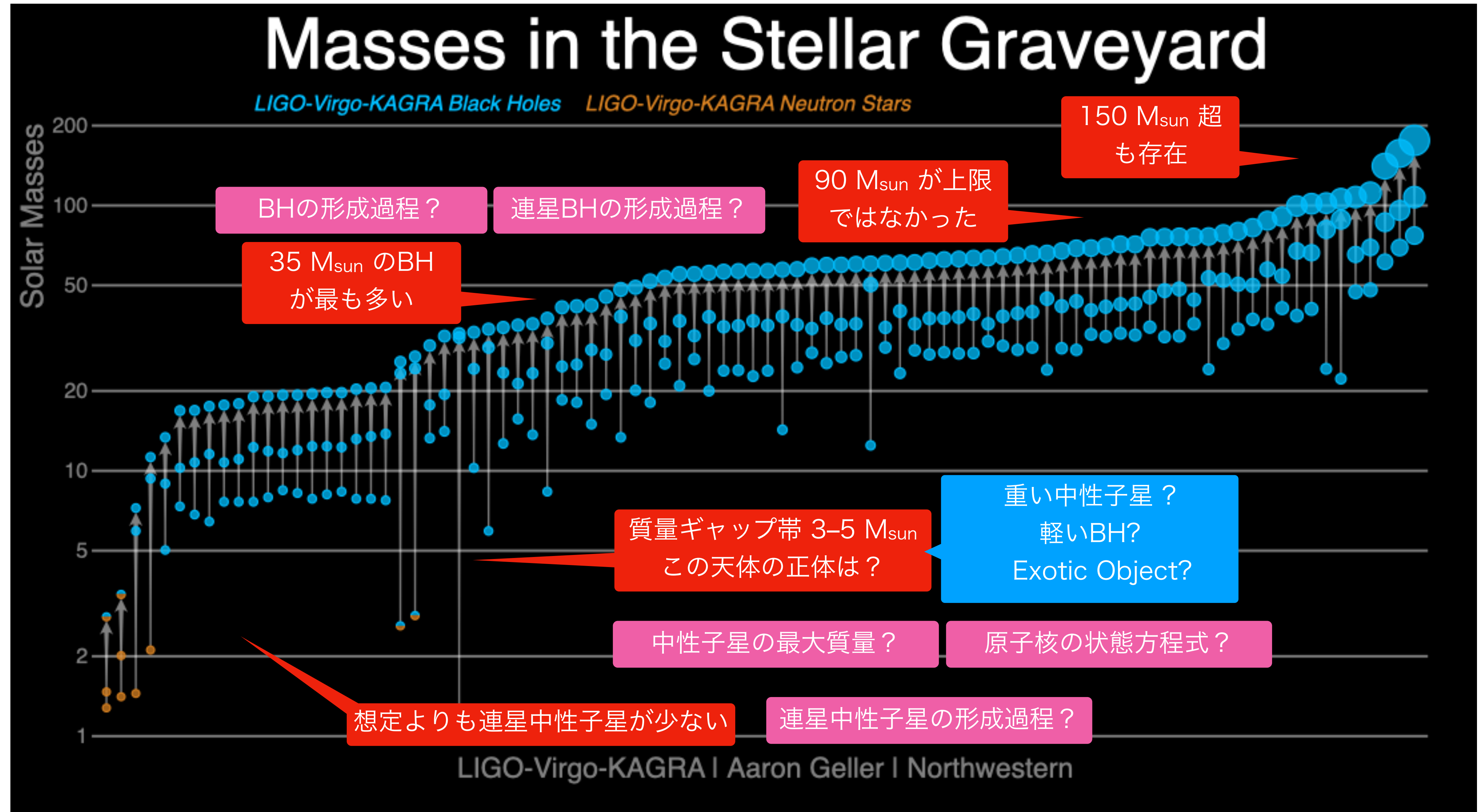
O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b:GWTC3 (2021/11/7 released)





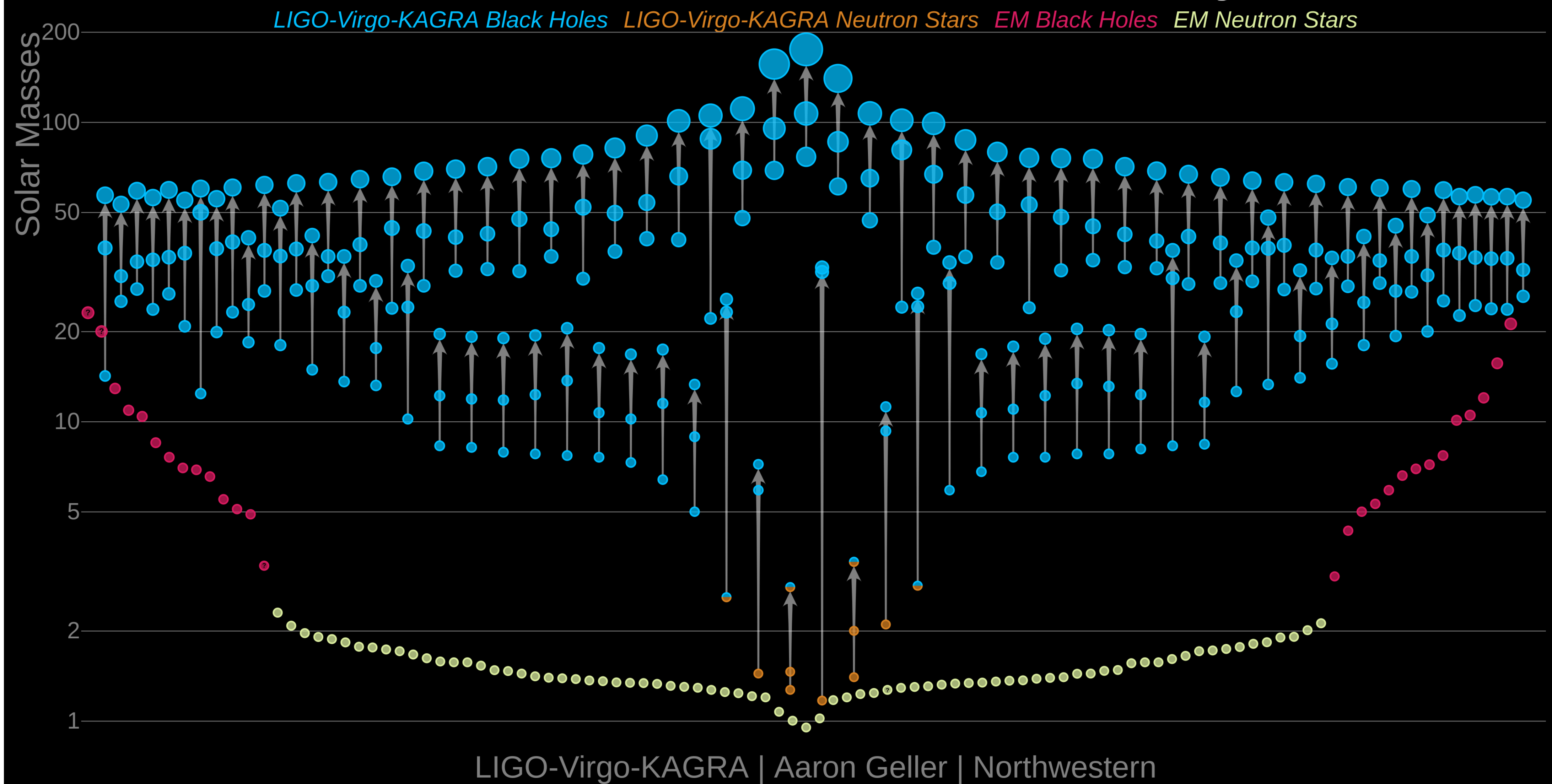
この現状をどう説明する？

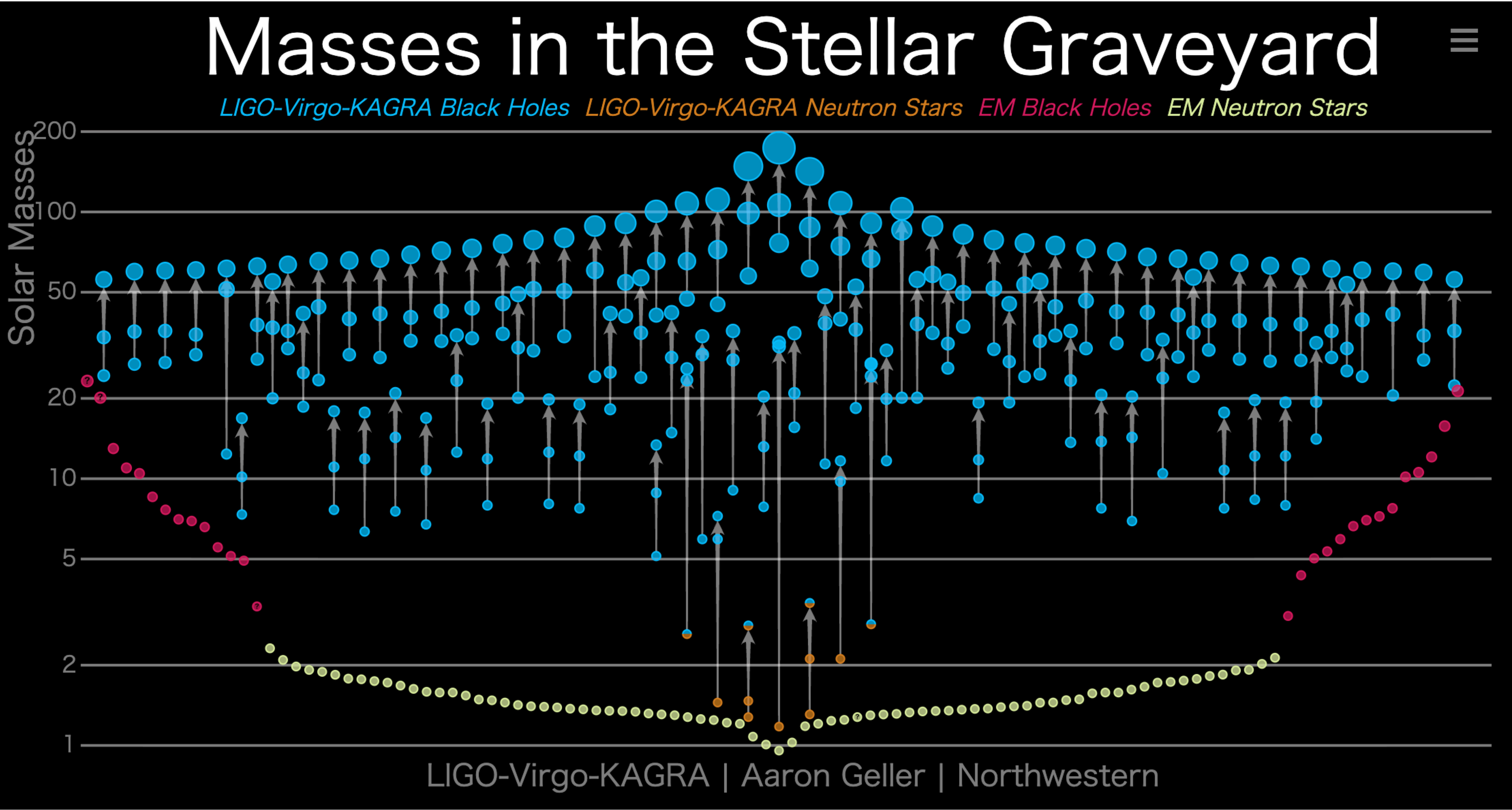


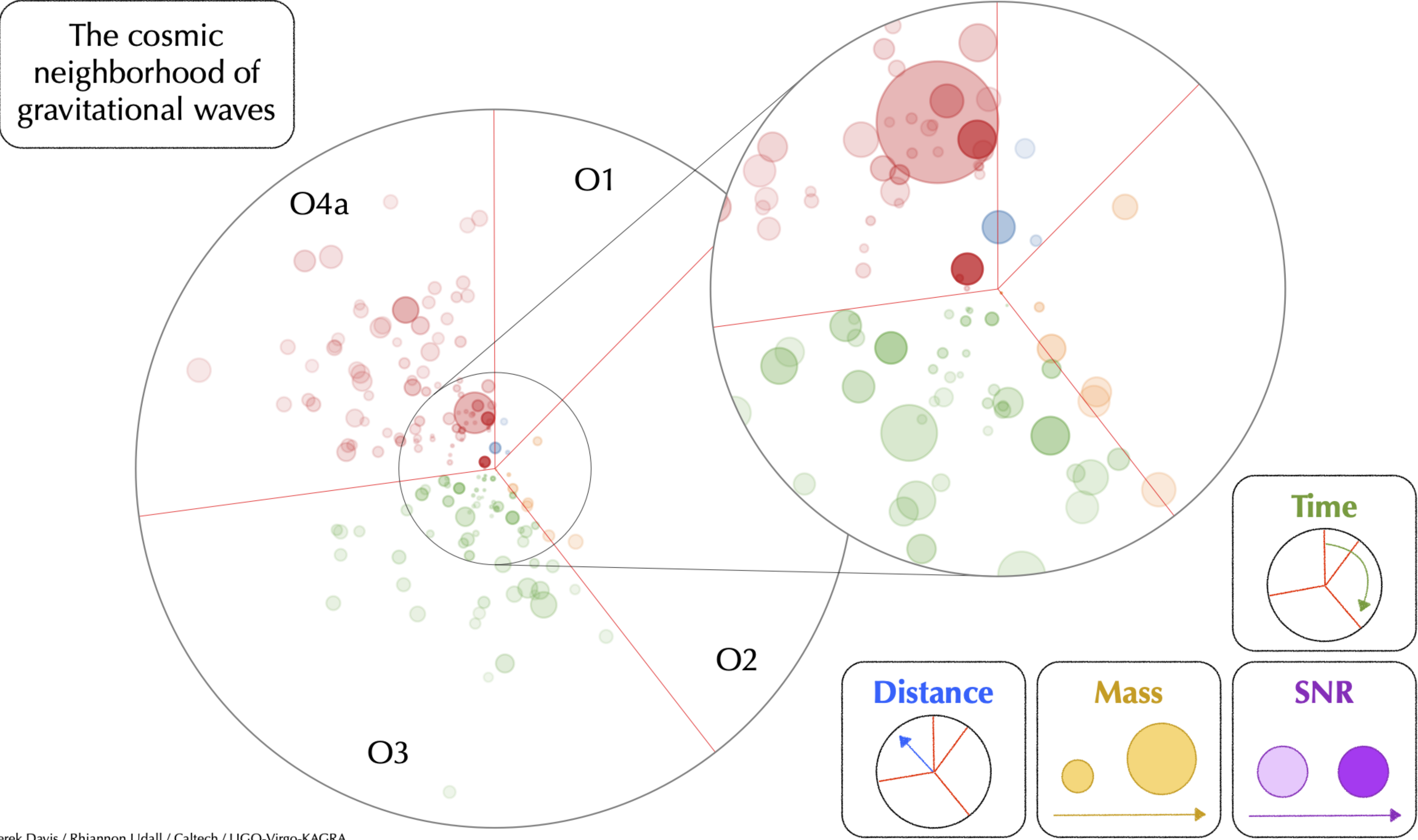
O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b:GWTC3 (2021/11/7 released)

Masses in the Stellar Graveyard

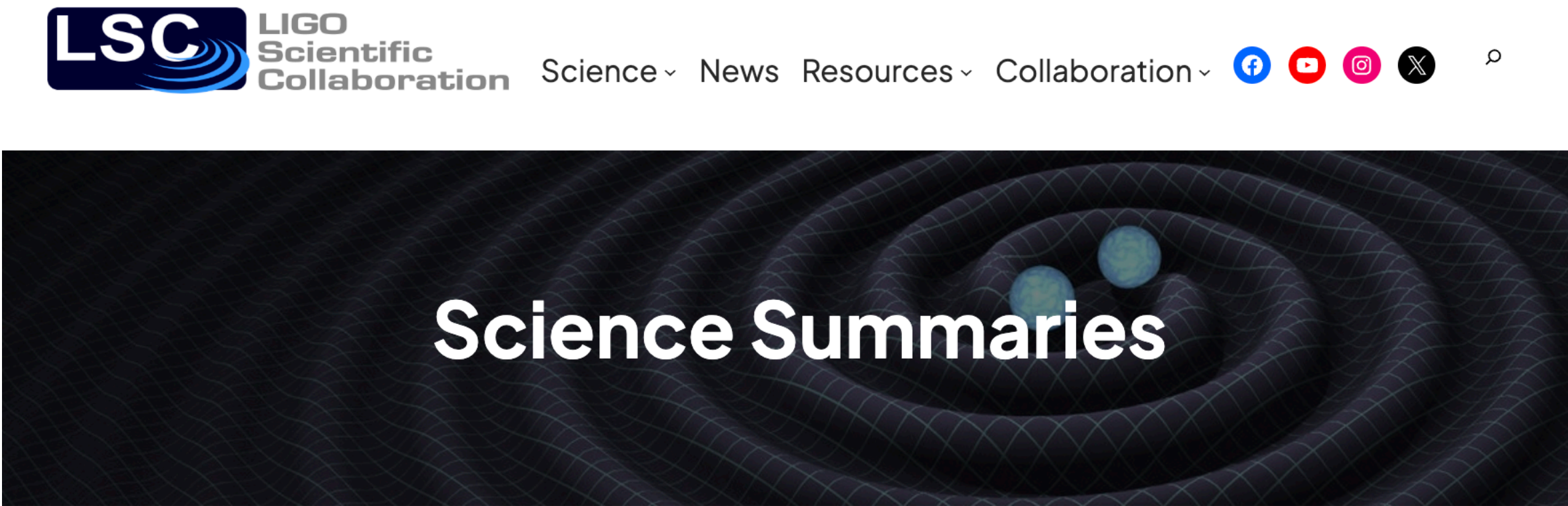






Derek Davis / Rhiannon Udall / Caltech / LIGO-Virgo-KAGRA

<https://ligo.org/science-summaries/>



For each of our new research articles, we feature a summary of the paper’s key points written for the general public. Simply click on any of the ‘[PDF]’ links for a downloadable file in PDF format. Translations into several languages are also available for some of these summaries. Most recent papers, and their summaries, are written together by the LIGO Scientific Collaboration (LSC), the Virgo Collaboration and the KAGRA Collaboration, forming the LVK collaboration.

Translations are a volunteer effort and different sets of languages are available for each summary. For most summaries, we list any available translations by their [ISO 639-1 / ISO 639-2](#) keys, as listed [here](#). **YOU CAN FIND TRANSLATIONS BY CLICKING ON THE BLACK TRIANGLE NEXT TO EACH SCIENCE SUMMARY ENTRY.**

Jump to: [2025](#) | [2024](#) | [2023](#) | [2022](#) | [2021](#) | [2020](#) | [2019](#) | [2018](#) | [2017](#) | [2016](#) | [2015](#) | [2014](#) | [2013](#) | [2012](#) | [2011](#)

Translations

You can search for the key of your language, in square brackets – for instance [fr] for French – on this page to find all science summaries that have been translated into it.

- **[bla]**: Blackfoot
- **[bn]**: Bengali (Bangla / বাংলা)
- **[ca]**: Catalan (Català)
- **[de]**: German (Deutsch)
- **[el]**: Greek (Ellinika / Ελληνικά)
- **[es]**: Spanish (Español / Castellano)

2025

▼ **Looking for short-duration gravitational wave sources in the deep dark sky**

2025-07-22 PDF: [\[en\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[vi\]](#)

4 languages

▼ **All-sky search for long-duration gravitational-wave transients in the first eight months of the fourth Advanced LIGO–Virgo–KAGRA observing run**

2025-07-22 PDF: [\[en\]](#) [\[ca\]](#) [\[es\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#) [\[vi\]](#)

7 languages

▼ **GW231123: The most massive black hole binary detected through gravitational waves**

2025-07-14

PDF: [\[en\]](#) [\[bn\]](#) [\[ca\]](#) [\[de\]](#) [\[el\]](#) [\[es\]](#) [\[fi\]](#) [\[fr\]](#) [\[hi\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[ma\]](#) [\[mr\]](#) [\[pt\]](#) [\[ta\]](#) [\[vi\]](#) [\[zh-Hans\]](#)

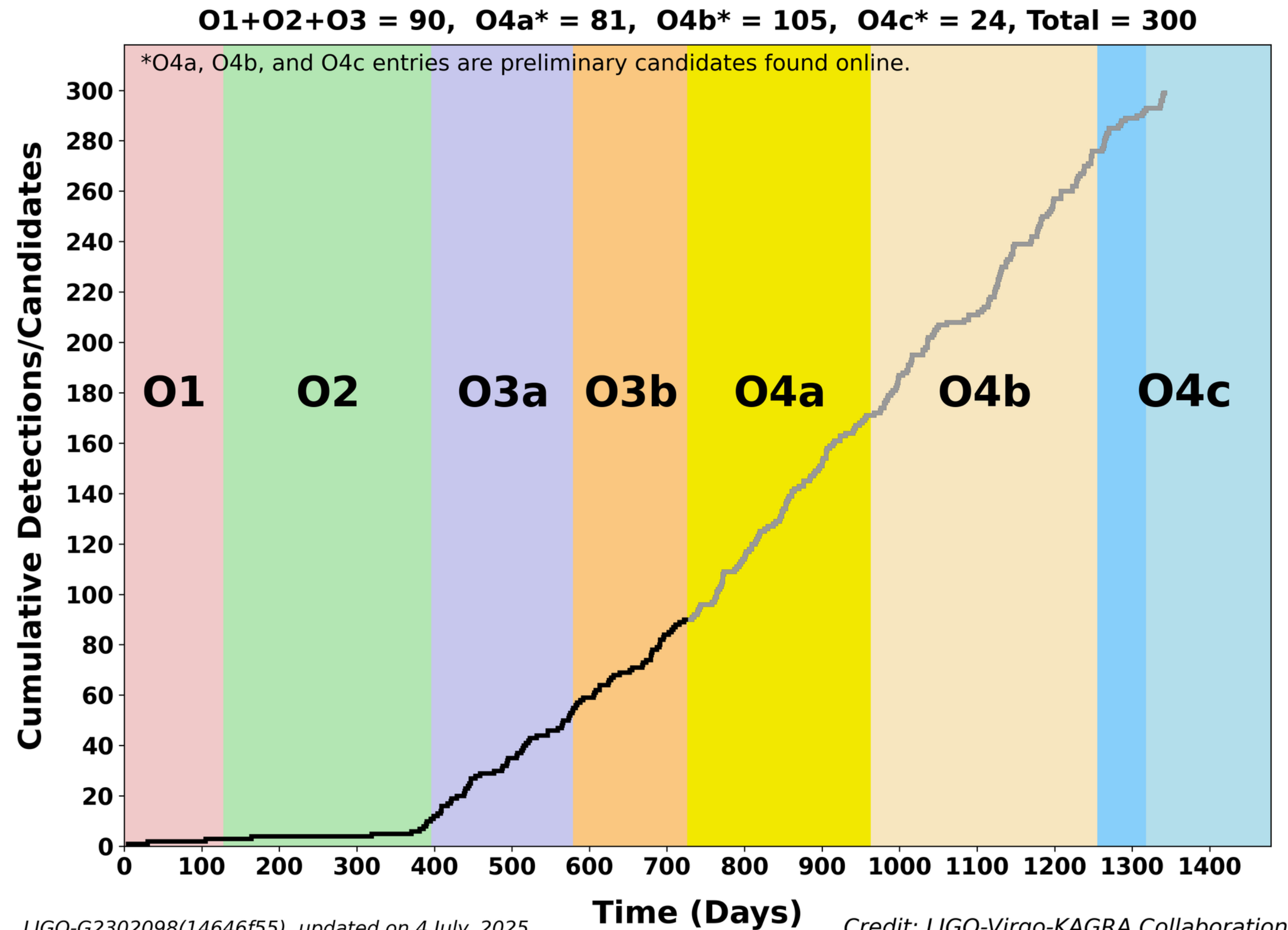
17 languages

▼ **No continuous gravitational waves from 45 known pulsars in O4a data**

2025-01-10 PDF: [\[en\]](#) [\[ca\]](#) [\[de\]](#) [\[es\]](#) [\[gl\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[nl\]](#) [\[ro\]](#) [\[vi\]](#) [\[zh-Hant\]](#)

黒い三角形をクリックすると、各言語版での解説リンクが現れます。

300個目の重力波検出を報告



LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、10年前に初めての重力波観測をして以来、総計300個目の重力波観測を世界中の天文台に通知しました。

300個目の報告は、S250704abという名前で、連星ブラックホール合体の可能性82%、ブラックホールと中性子星の連星合体の可能性18%と速報されました。現在、詳しい解析が続いています。

左図は、観測運転日数を横軸に、累積報告数を縦軸にして表した図で、観測運転期間（第1期をO1、第2期をO2などとする）ごとに観測する頻度が上がっていることがわかります。干渉計の調整をして観測感度を向上させているためです。

<https://gracedb.ligo.org/superevents/S250704ab/view/>

観測史上最大質量の連星ブラックホール合体を論文発表



LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、これまでの観測で最大質量となる連星ブラックホール合体からの重力波観測を報告しました。上図は、プレスリリースに使われたものです。 https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123_Japanese.pdf

観測史上最大質量の連星ブラックホール合体を論文発表

https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123_Japanese.pdf



GW231123: 重力波で観測された 観測史上最大質量の連星ブラックホール合体

重力波 GW231123 は 2023 年 11 月 23 日 13:54:30 UTC（世界標準時）に LIGO-Virgo-KAGRA (LVK、ライゴ・ヴィルゴ・かぐら) 共同研究グループによって観測され、LVK が観測した重力波としては観測史上最大の総質量をもつ連星ブラックホールの合体から生じたと考えられます。これらのブラックホールは非常に速く自転しており、また、各ブラックホールの質量は大質量星の進化過程についての既存の理論に疑問を投げかけるものです。

重力波信号の観測

この重力波は第 4 期重力波観測運転の第 1 部 (O4a) 中にワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リヴィングストンにある LIGO の 2 つの検出器によって観測されました。信号が 2 台の検出器で一貫して検出されたことが、この重力波観測を確実なものとなりました。図 1 に示すように、この重力波信号は 0.1 秒ほどの長さでしたが、検出器の通常の雑音分布に比べて **20 倍ほどの強さ**でした。この信号が観測データの大部分を占める雑音でないことを示すため、私たちは統計的な解析を注意深く行いました。数千年の長さに相当する擬似データのシミュレーションなどの手法を用いることで、雑音 **が GW231123 のような重力波信号を生じさせることは 10,000 年に一度より少ないことがわかりました**。このことは重力波信号が天体由来であること、すなわち重力波源から生じたものであることを強く確証づけます。

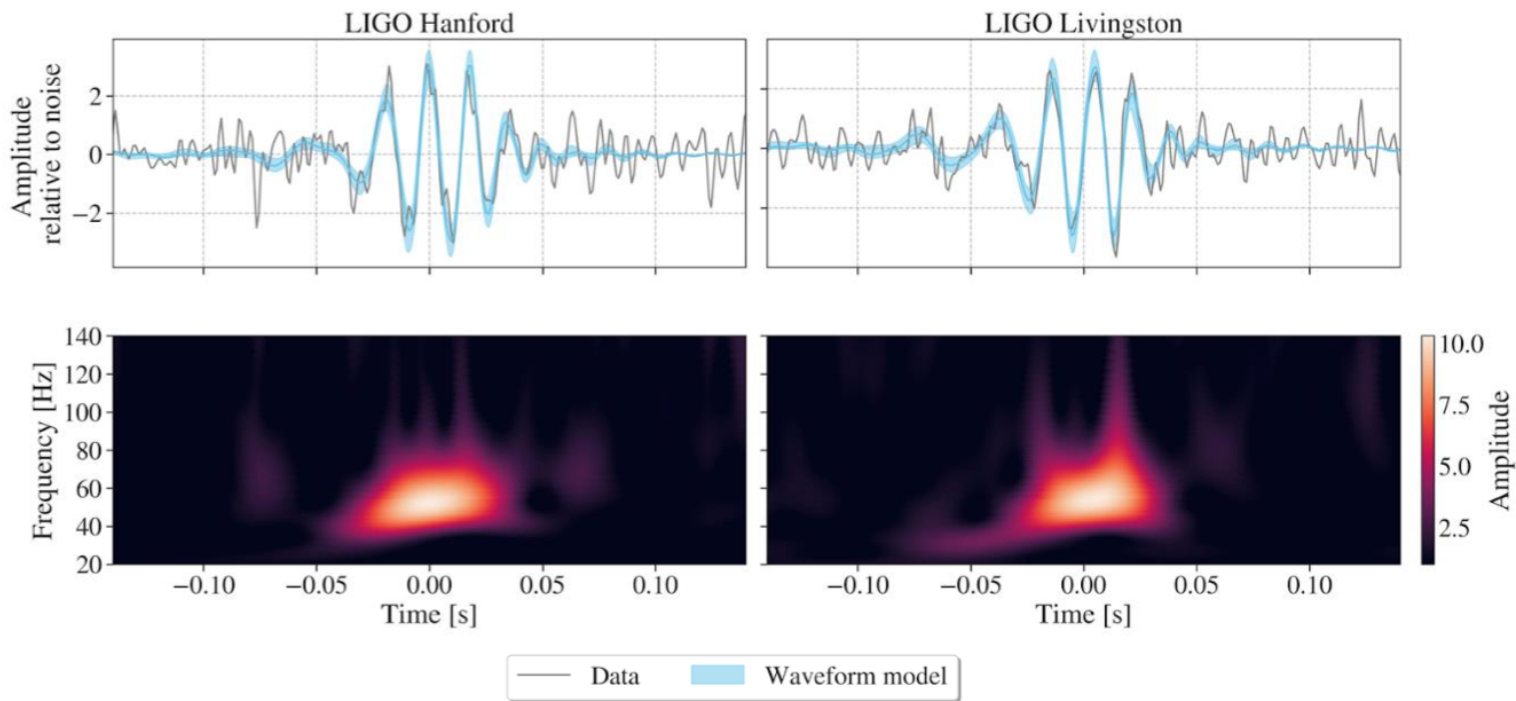


図 1: LIGO ハンフォード (左図) と LIGO リヴィングストン (右図) で観測された GW231123 の重力波信号のデータ。上図は時間に沿った観測データの振幅をグレーで、波形モデルによって得られる重力波信号の予想値を水色で表す。下図は重力波信号の振幅の時間（横軸）と周波数（縦軸）変化を表す。明るい色はより強い重力波信号を表す。

重力波信号の波源

重力波信号が 2 つのブラックホールの合体によって生じた可能性が高いことが観測データからわかります。合体前の 2 つのブラックホールの質量や自転を理解するために、私たちはアインシュタインの一般相対性理論に基づく複数のモデルを使い、さまざまなブラックホールの対のシミュレーションを行いました。観測データとシミュレーション結果を比較することで、合体前のブラックホールがそれぞれ太陽質量の約 137 倍と約 103 倍であることが判明しました。あらゆる不確定性を考慮した結果、連星の総質量が太陽質量の約 190～265 倍であり、これまで観測された連星ブラックホールの合体で最大の総質量であった GW190521 よりも大きな質量であることがわかりました。さらに興味深いことに、2 つのブラックホールそれぞれが理論上の最大自転速度に近い値で自転していたのです。したがって、**GW231123 はこれまでに高い信頼度で観測されてきた重力波信号の中でも、最大総質量のみならず、最大自転速度である連星ブラックホールを波源とするもののなのです**。

ブラックホールは合体して、太陽質量の約 182～251 倍の残骸ブラックホールを生成しました。合体によってできたブラックホールの質量は中間質量ブラックホールと呼ばれる珍しい分類に属します。中間質量ブラックホールは恒星の崩

壊から生成されるブラックホールよりも重く、銀河中心にある超巨大ブラックホールよりもずっと軽い質量帯なのです。GW231123 と GW190521 は重力波によって高い信頼度で観測され、その残骸ブラックホールは共にこの興味深い分類に属しています。

なぜこれらの性質が興味深いのか

既存の恒星進化論では、太陽質量の約 60～130 倍のブラックホールは非常に稀、または、存在しないとされています。この「禁じられた」質量領域はブラックホールの質量ギャップと呼ばれ、このギャップは大質量星を引き剥がす特殊な超新星爆発である対不安定型超新星によって、または、崩壊前に自身の質量のうちかなりの部分を放出する脈動性対不安定型超新星によって、よち大きな質量のブラックホールが形成されないことで生じると考えられています。しかし、GW231123 はこの想定に疑問を投げかけます。合体した 2 つのブラックホールのうち軽い方のブラックホールは 83% の確率で、重い方は 26% の確率でこの質量ギャップに属するのです。すなわち、既存の恒星進化論ではこれらのブラックホールの起源を十分に説明することができない可能性があるのです。

興味深い仮定のひとつとして、合体したブラックホールのうちの 1 つまたは両方が過去の連星ブラックホール合体によって生成された、とする多重合体シナリオがあげられます。この仮定は合体前のブラックホールの質量と自転速度が大きいことを説明することができ、さらに、核星団や活動銀河核のような星が密集した環境に存在していたためブラックホール同士の合体が起こりやすかったことが考えられます。このような密度が高い環境ではブラックホールが互いの周りを歪んだ軌道で、すなわち離心率が 0 でない軌道を通ることがあります。その複雑性ゆえ私たちが現在用いるモデルでは連星ブラックホールはほぼ円起動を辿り、重力波を放出しながら軌道が徐々に縮小していくと仮定しています。しかし、軌道の離心率が（特に合体直前で）大きい場合、放出される重力波に影響を及ぼす可能性があるものの、現在のモデルで捉えることができません。GW231123 はこの可能性が残っており、より高度なモデルで調べる必要があります。

GW231123 のような重力波信号を生じる現象としては他にも重力レンズ効果、原始ブラックホール、重力崩壊型超新星、ボゾン星の合体や宇宙ひもなどが挙げられますが、これらは上記で説明されたシナリオより天体物理学の観点から可能性が低いと考えられます。

合体の最終段階

LVK が観測してきた（この要約が書かれた時点では 300 近い）連星ブラックホール合体のほとんどにおいて、検出器は重力波信号の最初のインスパイラル部分（ブラックホールが合体前に互いの周りを周回する段階）での感度が最も高くなっていました。しかし、GW231123 はその大質量ゆえに、合体とリングダウン段階の観測が可能です。このリングダウン段階は生成された残骸ブラックホールが重力波を放出しながら振動し、最終的に安定した状態に落ち着く現象のことで、鳴らされた鐘が徐々に静まる様子に例えられ、「リングダウン」と呼ばれます。

重力波信号の最終段階と一般相対性理論によって予想されるブラックホールのリングダウンを比較することで、理論と観測データが良く一致することが結論づけられました。なお、GW231123 の極端な性質は我々のモデルの限界を試したことで、説明しきれない領域を残し、我々の波形モデルに改善の余地があることを示しました。

結論

数年前、私たちが発表した GW190521 の要約 で「記録は破られるためにある」と締めくくり、GW231123 はまさにそれを成し遂げました。質量ギャップに属する可能性と理論上の限界に近い自転速度をもつこの重力波源は特殊だけでなく謎も残しました。今回の発見は既存の恒星進化論を超えたブラックホール生成シナリオを探索する必要性と波形モデルの限界を私たちに示しました。私たちが重力波を通して宇宙に耳を澄まし続ける中で、GW231123 は宇宙がまだ多くの驚きと謎を用意してくれていることを示しています。私たちはそれらを明らかにし始めたばかりなのです。

さらに情報を得るには

LIGO のウェブサイト：<http://ligo.org/>
VIRGO のウェブサイト：<http://www.virgo-gw.eu/>
KAGRA のウェブサイト：<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>



GW231123 の発見についての論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500026/public>
重力波オープンデータサイエンスセンター(GWOSC) で公開されている GW231123 のデータ：
https://www.gw-openscience.org/eventGWapi/html/O4_Discovery_Papers/

日本語訳：左近喜音、真貝寿明

LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、これまでの観測で最大質量となる連星ブラックホール合体からの重力波観測を報告しました。

左はLIGOのウェブサイトに掲載された日本語解説です。（16ヶ国語で解説がなされています）

GW231123 日本語解説



2507.08219

バースト重力波は、まだ見つからず



図 1: 中性子星合体の後に形成された超大質量中性子星の想像図。このような特異な天体は、長時間持続型の重力波バーストを引き起こす可能性があります。Credit: ESO/L. Calçada/M. Kornmesser

LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、連星合体以外の重力波探索（バースト探索）を第4期a観測運転(O4a)のデータに対して行った結果を論文投稿しました。2台以上の干渉計データで同時刻に重力波が観測された可能性のあるデータを精査した結果、未検出という結論になりました。

ただし、重力波の振動数や振幅に対して、これまでの観測にくらべて厳しい制限をつけることができました。

今回の解析には初めて機械学習が導入されました。

日本語解説ページ

O4a LongBurst 日本語解説



2507.12374

O4a ShortBurst 日本語解説



2507.12282

継続時間1秒未満のバースト波源として考えられるもの

- ＊超新星、パルサー・グリッチ（回転速度の変化）

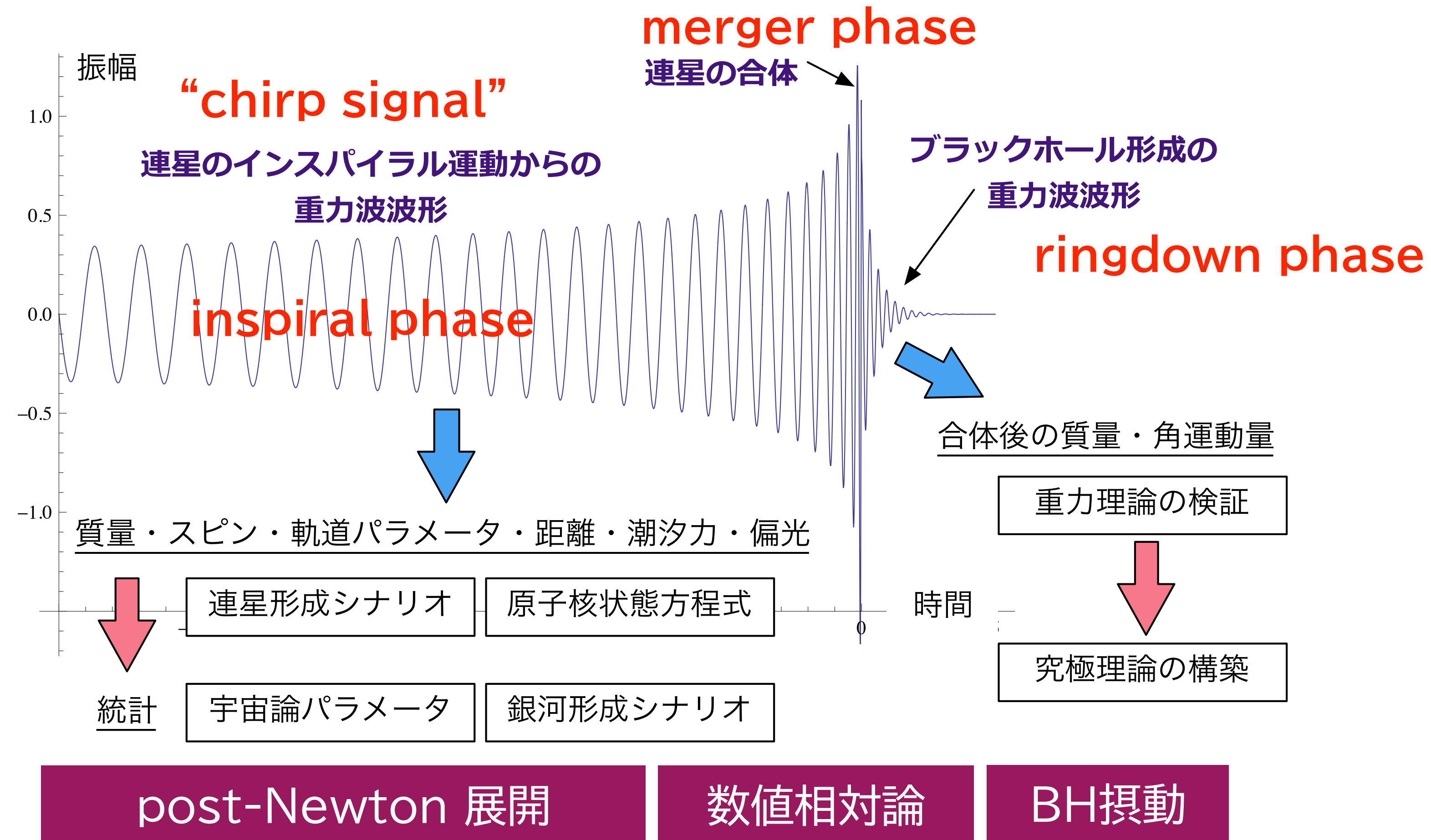
継続時間1秒-100秒のバースト波源として考えられるもの

- ＊誕生直後の中性子星

- ＊ブラックホール周囲の不安定降着円盤

- ＊非常に離心率の高い軌道を周回する中性子星またはブラックホール連星

重力波で何がわかる？



- ★ ノイズにまみれた観測データに、予想される波形を掛け合わせて、重力波の検出を行う(matched-filtering法)
- ★ 数値シミュレーションを用いたテンプレートづくり+パラメータで補間した波形モデル
- ★ 連星BHのパラメータ

$$(m_1, m_2, s_1, s_2, \iota, \mathbf{n}, t_c, \varphi_c, \psi, r)$$

質量, スピン, 軌道傾斜角, 合体時刻, 位相, 偏角, 距離

重力波で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

→ 原子核の状態方程式

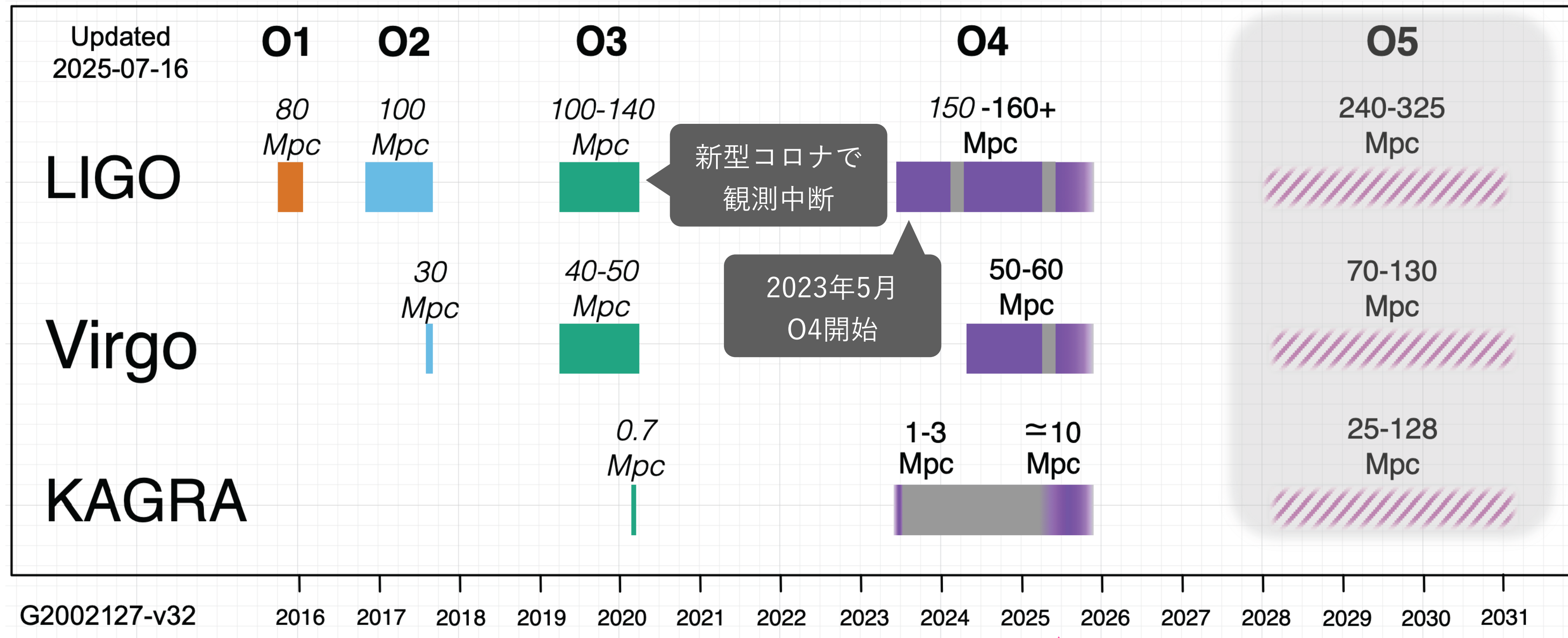
イベント頻度・統計

→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4)



重力波のデータカタログ公開
Gravitational Wave Transient Catalog



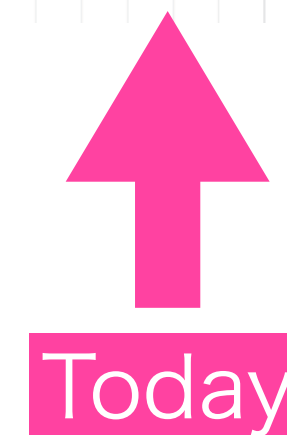
GWTC-1
2018/12/3

GWTC-2
2020/10/28

GWTC-2.1
2021/8/2

GWTC-3
2021/11/5

GWTC-4
2025/8/26

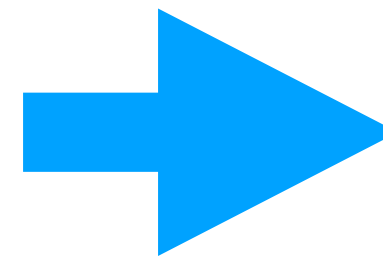


Today

<https://observing.docs.ligo.org/plan/>

わかったこと

重力波は存在する
重力波は観測できる
相対性理論は正しいようだ
連星ブラックホール結構ある
連星中性子星あまりない
連星中性子星合体で元素合成
連星中性子星合体で γ 線バースト



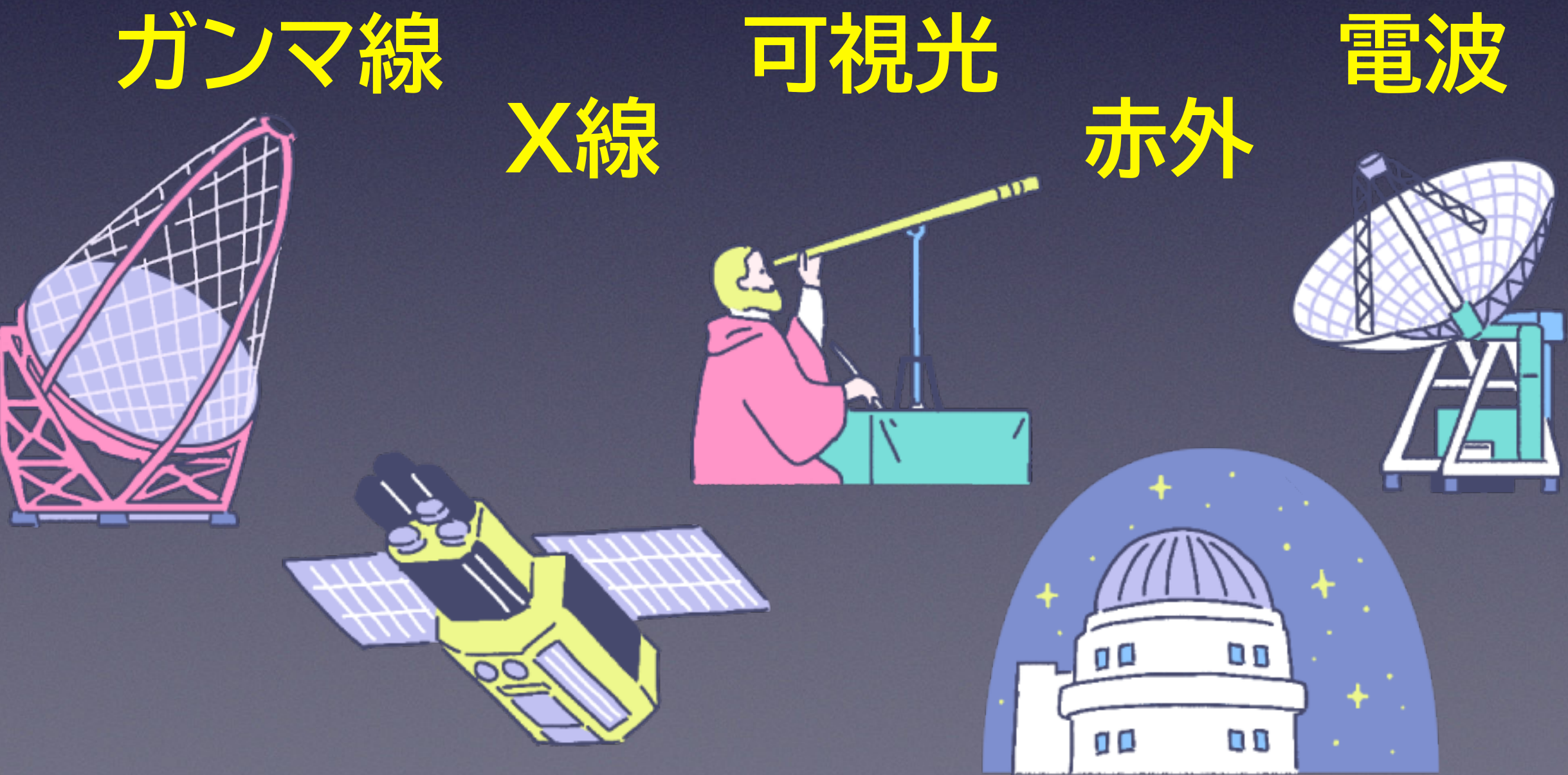
わからないこと

超新星爆発からの重力波？
パルサーからの重力波？
相対性理論はどこまで正しいのか
今後どれだけ発見されるか
今後どれだけ発見されるか
元素合成のメカニズム
 γ 線バーストのメカニズム
ブラックホールはどう形成されたか
連星合体によるブラックホール成長？
原始ブラックホール？
銀河中心の巨大ブラックホール？
未知の重力波源？

重力波観測は, 物理学から天文学へ

マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

													
	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波						
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波	
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4		
波長[nm]				380	770								
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4	
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	テレビ FMラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波時計 飛行機の通信		



重力波



Sの科学 Yの科学

Sの科学

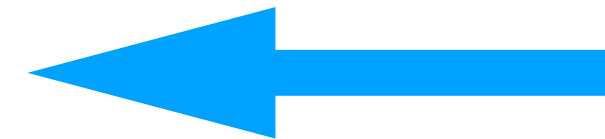
physic**s** 物理
mathematic**s** 数学
statistic**s** 統計学
genetic**s** 遺伝学

Yの科学

astronom**y** 天文学
econom**y** 経済学
biolog**y** 生物学
archaeolog**y** 考古学
anthropolog**y** 人類学
sociolog**y** 社会学

体系化の学問

対象物の性質を理論で説明



発見の学問

対象物を分類し記載

相対性理論

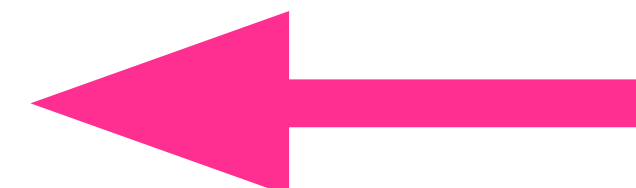


ブラックホール

膨張宇宙

重力波

宇宙物理学



ブラックホールと重力波

何がどこまでわかったか

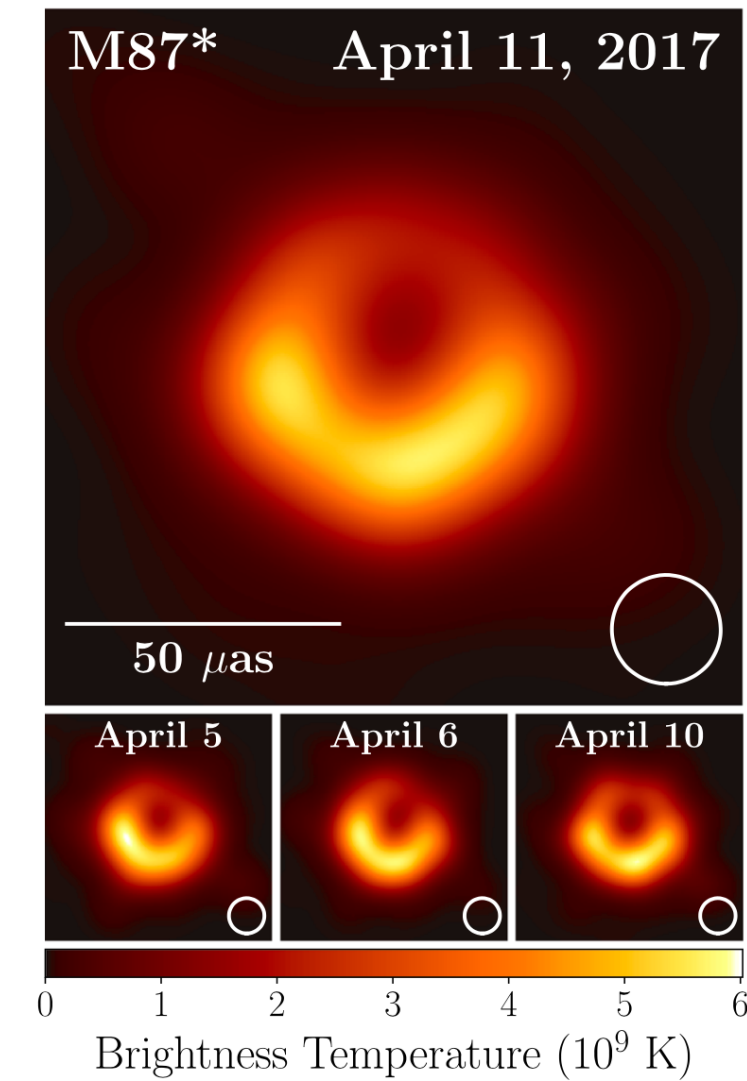


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels ($20\ \mu\text{as}$ FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature, $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$, where S is the flux density, λ is the observing wavelength, k_B is the Boltzmann constant, and Ω is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

ブラックホールが直接、
撮影できるようになりました！

重力波が観測できるようになりました！

詳しく撮影したい
動画を撮りたい。

2025年8月にデータ公開，全部で176個

より多くの観測で，
宇宙の歴史・銀河の歴史の解明へ

