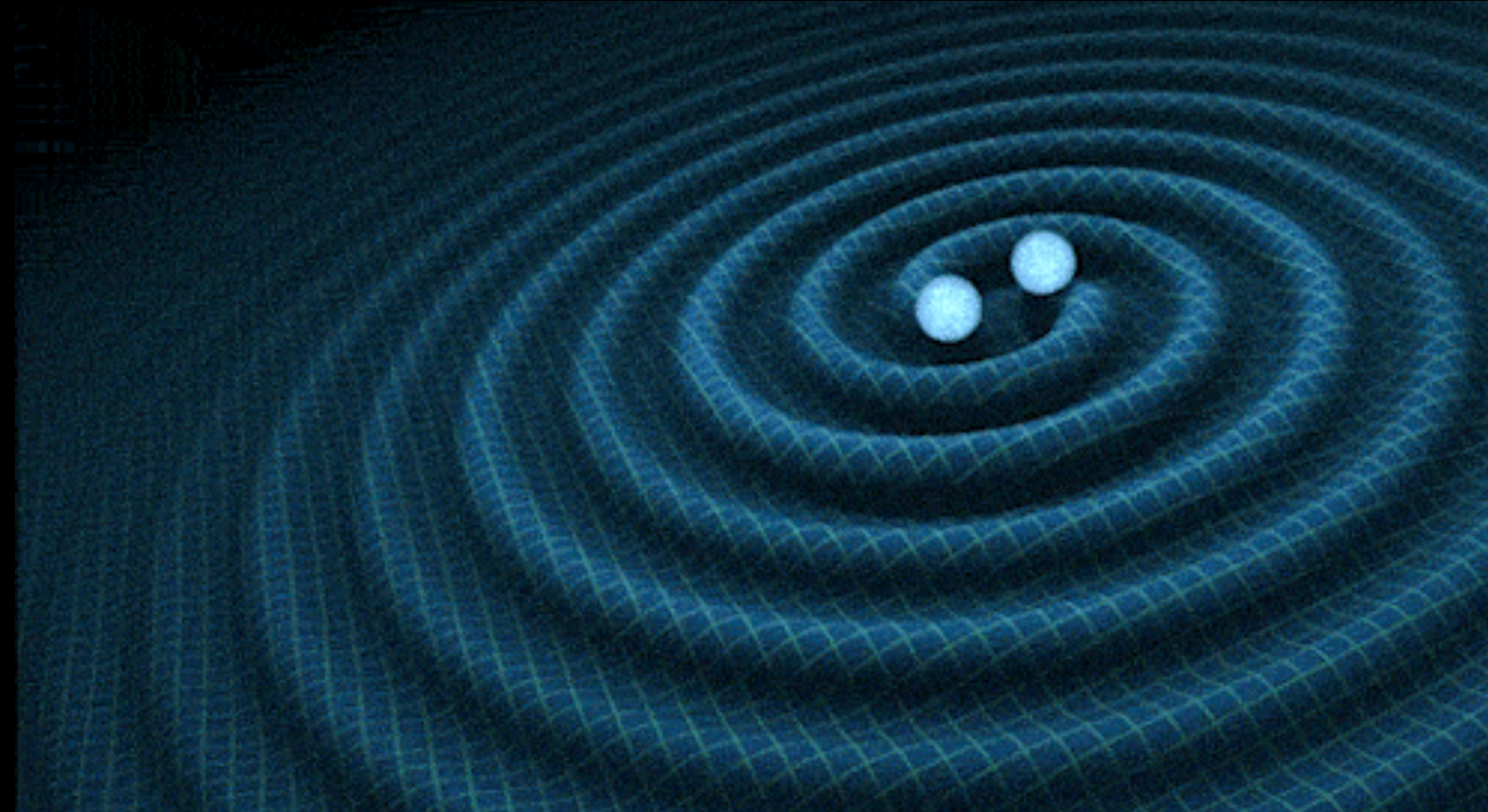


ブラックホールと重力波

ブラックホールを👁️(みる) 👂(きく)
身近な物理現象と最先端の物理研究



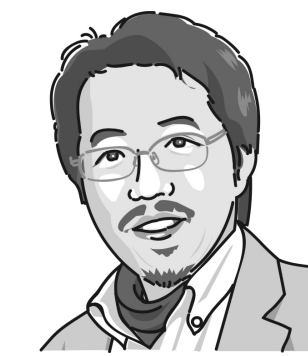
2026/8/2 SVAC



真貝寿明・大阪工業大学
(しんかい ひさあき)

<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/>

ブラックホールと重力波



真貝寿明・大阪工業大学

(しんかい ひさあき)

<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/>

小学生向け

https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/BHGW/BHGW_Yasashiku_version.pdf

一般向け(中学・高校生以上向け)

https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/BHGW/BHGW_Kuwashiku_version.pdf

理系大学生向け

https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/BHGW/BHGW_Honkide_version.pdf

スライド

https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202608_SVAC_shinkai_slide.pdf

小学生向け



一般向け



理系大学生向け



このスライド



極限時空展（大阪市立科学館, 明石市立天文科学館, 仙台市天文台, はまぎんこども宇宙科学館, 2025年）



1
For 11-yrs old

小さいころの
アインシュタインは、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

年著「エレメントは参考文献[1]より

1. アインシュタインと相対せい理ろん

ブラックホールと重力波



《 詳しく解説編 》
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、

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1)$$

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想されました。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**の存在も予想されました。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)

ブラックホールと重力波



《 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。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \quad (2)$$

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

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

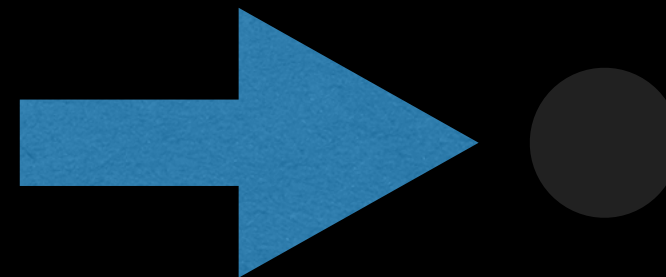
ここで、 ∇ は微分演算子で、 $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})^T$ である。

(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

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

★何でも吸い込む。光も脱出できない重い星



ここ

2. 見えないはずでは？

⇒ 見えたんです!!

3. 音も聞こえないはずでは？

⇒ 重力波で聴こえたんです!!!

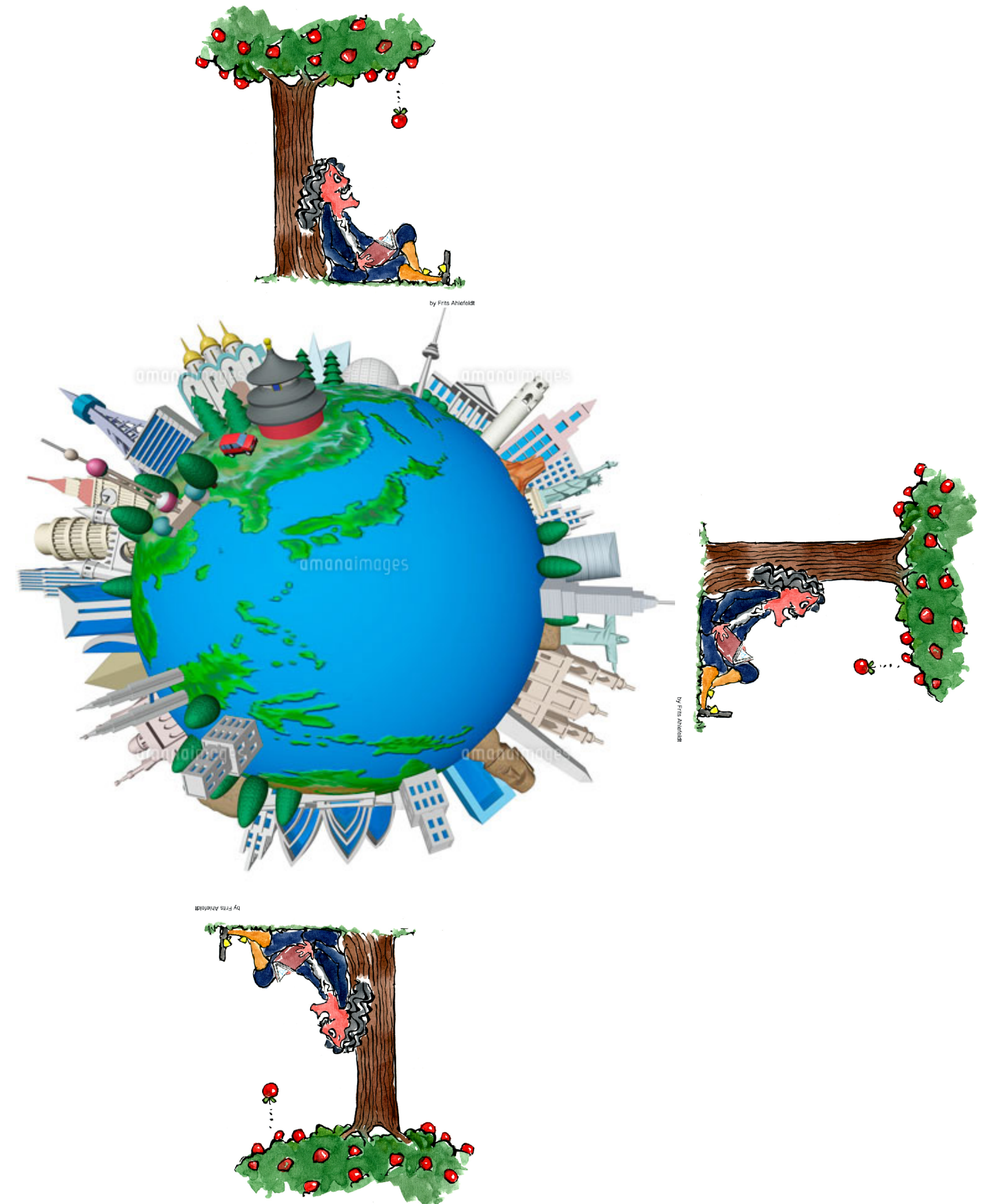
重力の正体は？



ニュートン
(1642—1727)



<http://hikingartist.com/>



重力の正体は？



ニュートン
(1642—1727)

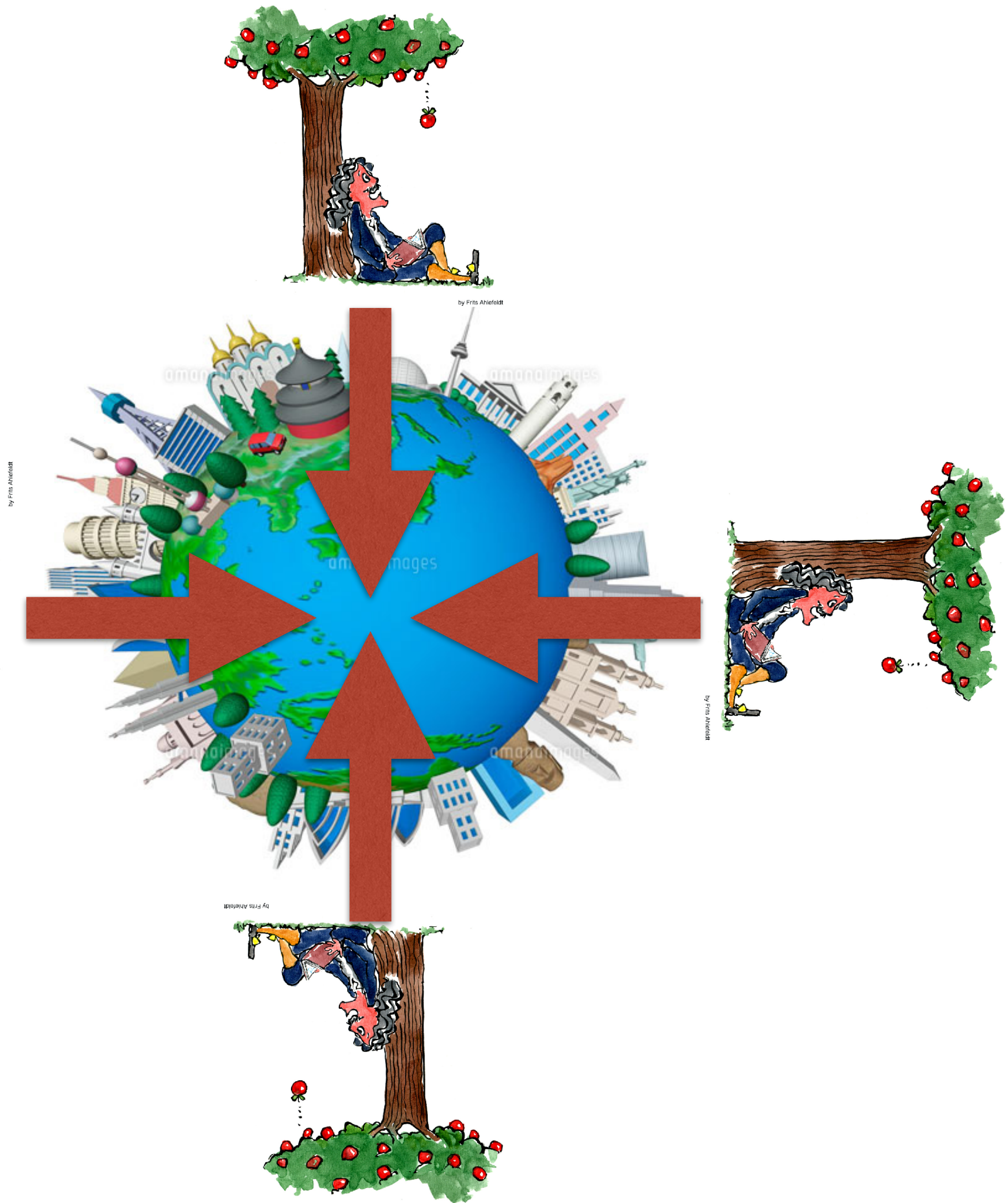


by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



by Frits Ahlefeldt

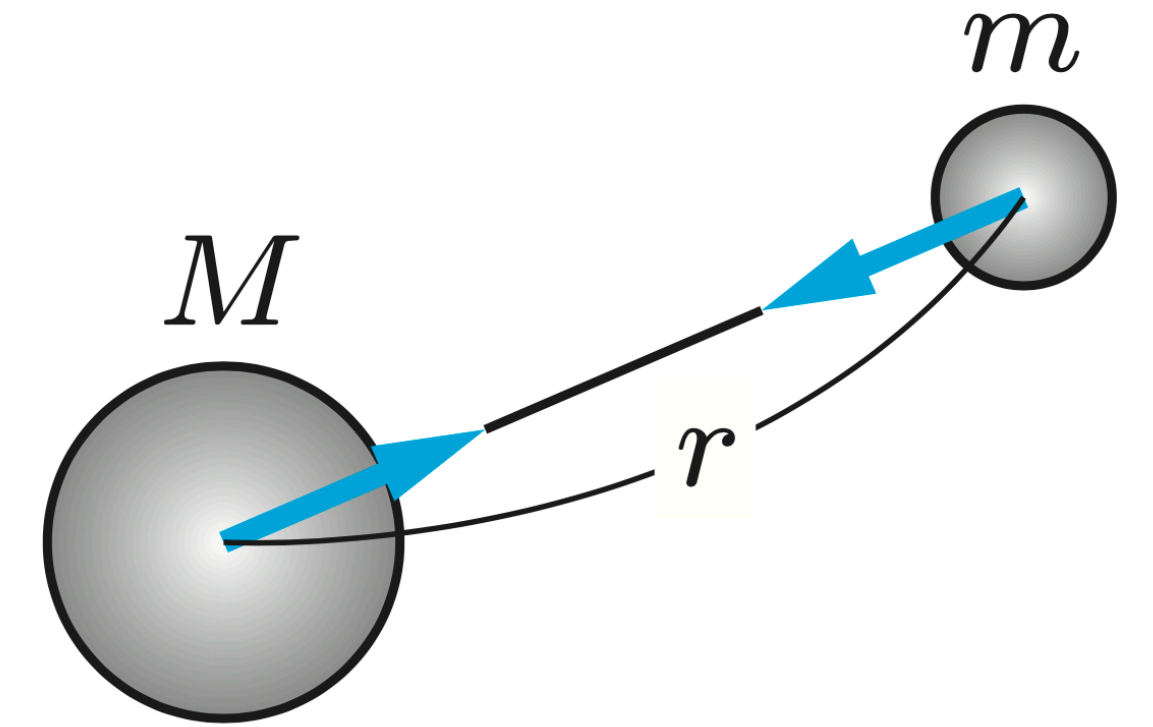


地球がリンゴを引っ張る
リンゴも地球を引っ張る
⇒すべてが引力をおよぼす
(万有引力)

重力の正体は？

万有引力 = すべてのものは引力で引き合う

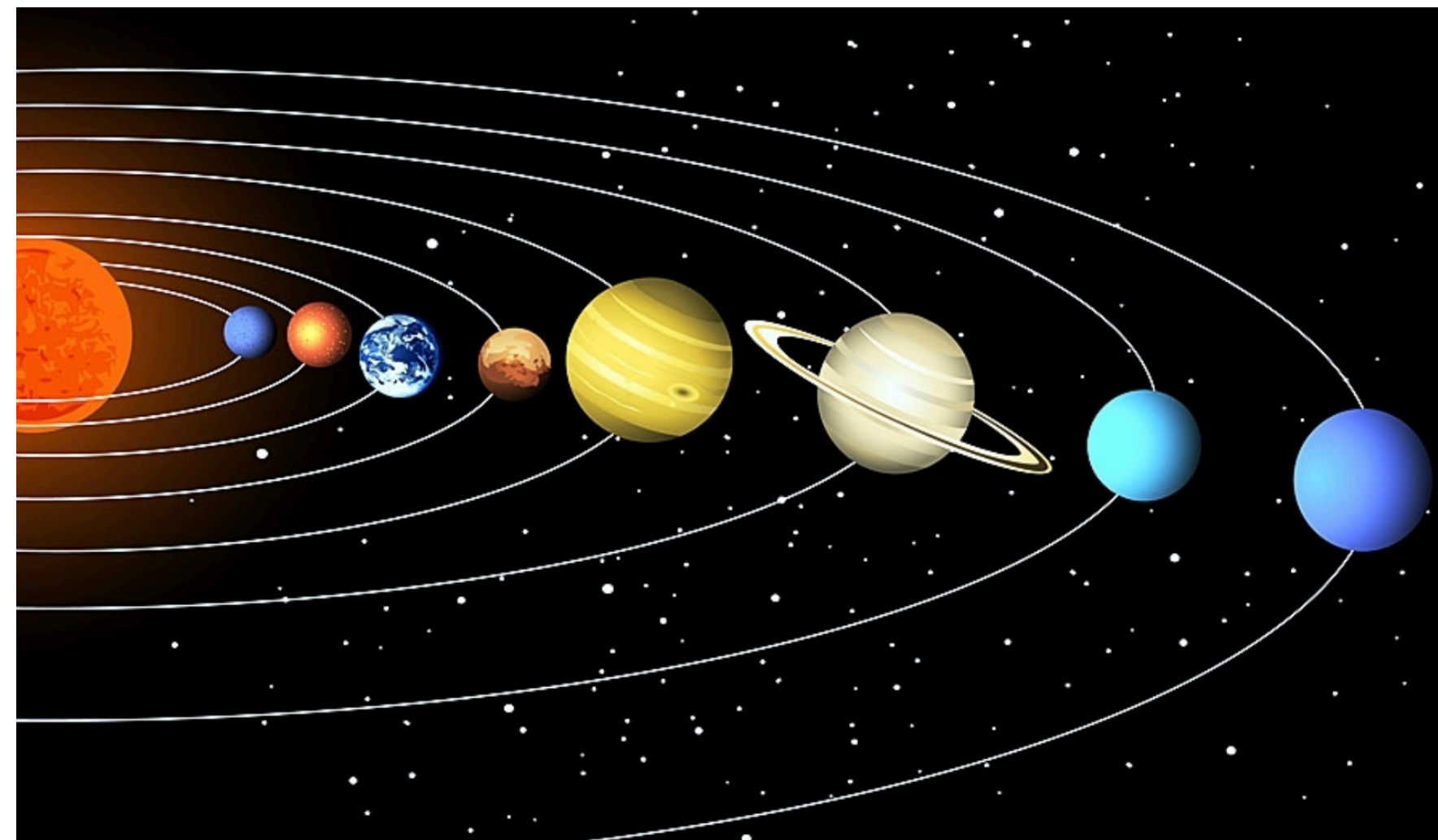
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$



リンゴも



ニュートン
(1642—1727)



太陽系も

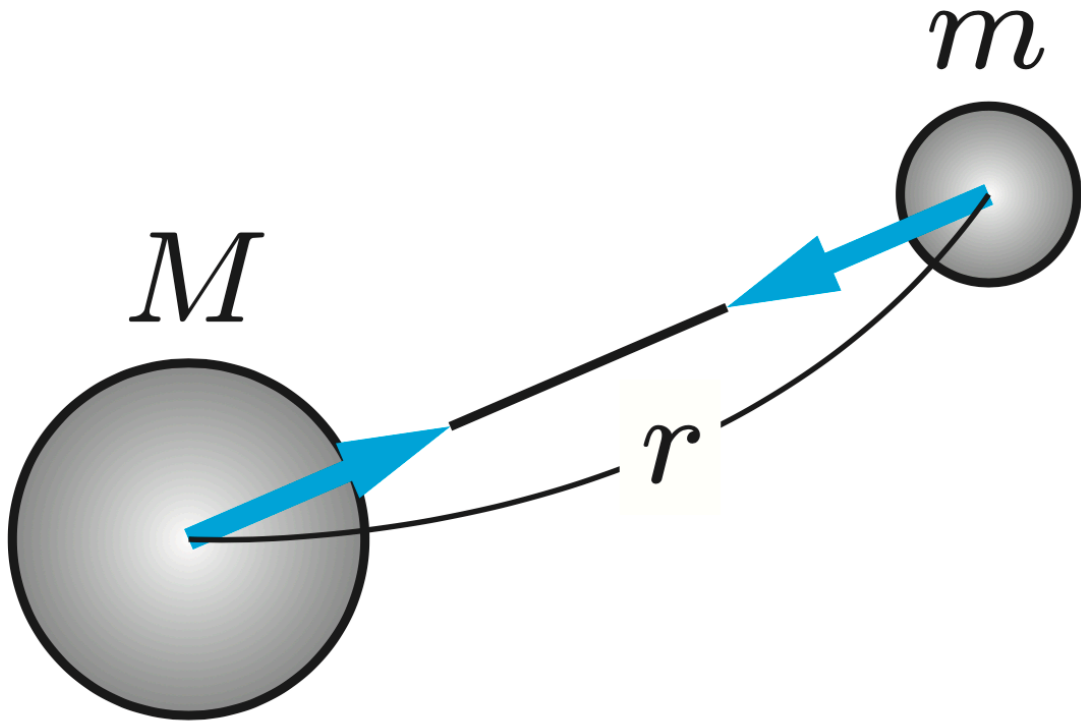


銀河系も

ちがう星だと体重がちがう

万有引力 = すべてのものは引力で引き合う

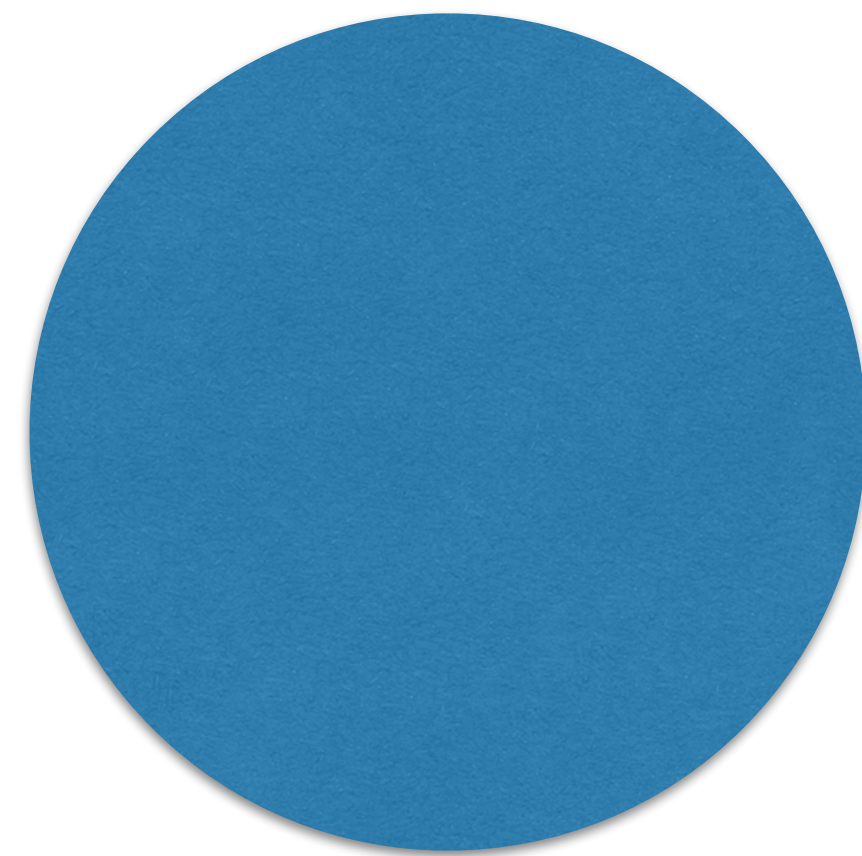
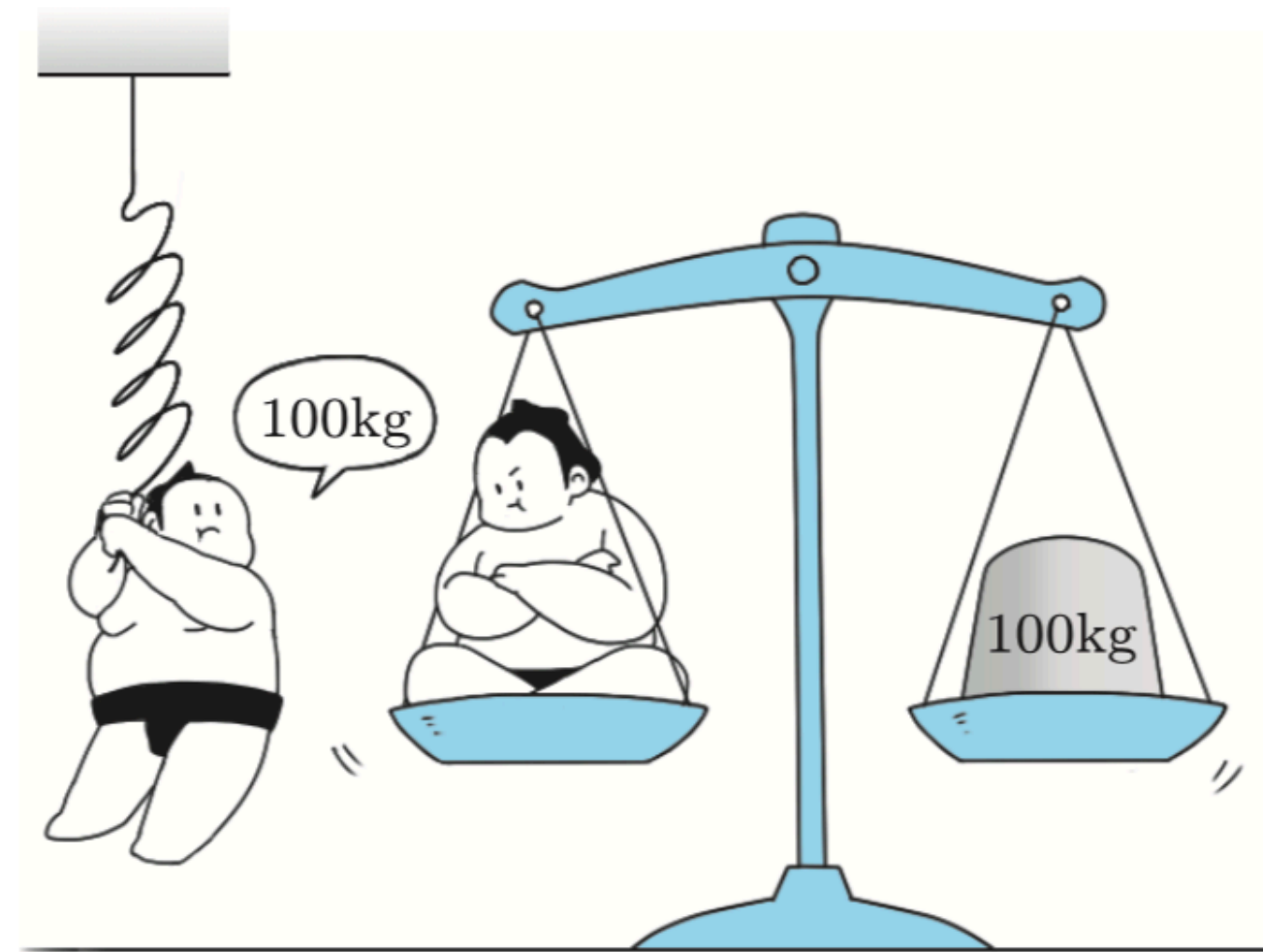
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$



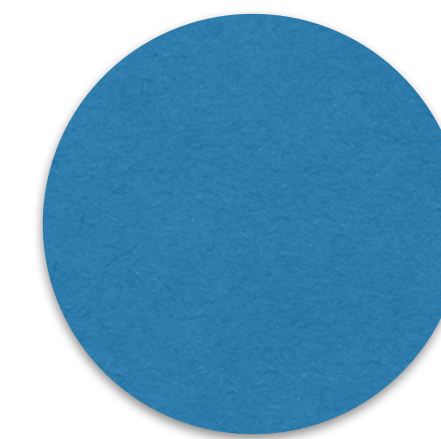
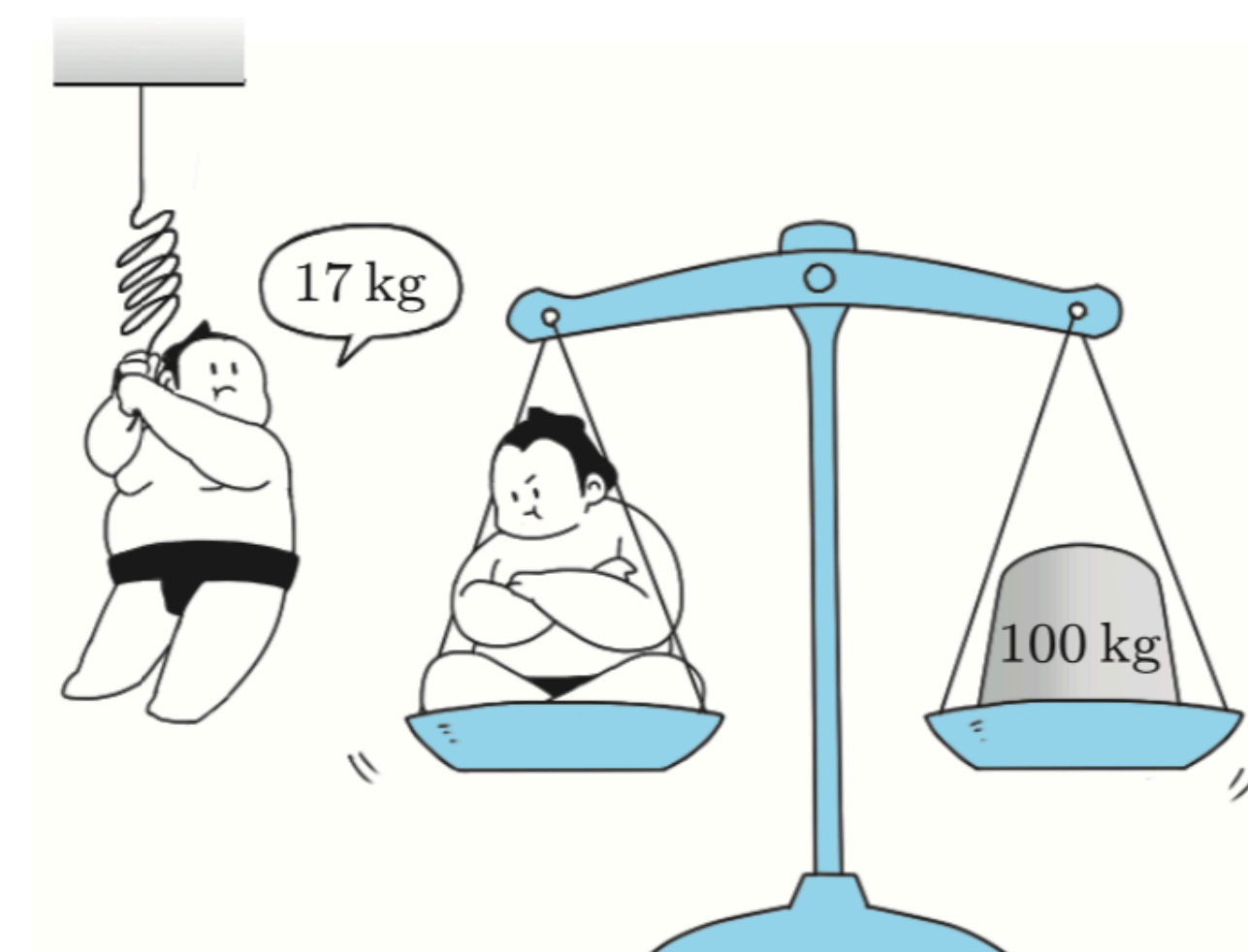
重力の大きさ = 定数 × 地球の質量 × 物体の質量 ÷ 地球の半径 ÷ 地球の半径

星	質量	地球の何倍か	半径	地球の何倍か	重力は何倍か
地球	6.0×10^{24} kg	1	6370 km	1	1
月	7.3×10^{22} kg	0.012	1730 km	0.27	0.165
火星	6.4×10^{23} kg	0.11	3390 km	0.53	0.377
木星	1.9×10^{27} kg	317	69900 km	11	2.63
土星	5.7×10^{26} kg	95	58200 km	9.1	1.14
太陽	2.0×10^{30} kg	333	700000 km	110	27.6

ちがう星だと体重がちがう



地球で100kgの体重は



月では 17kg に

木星では 250kg に

「月はどのようにして地球に落下しないのか？」

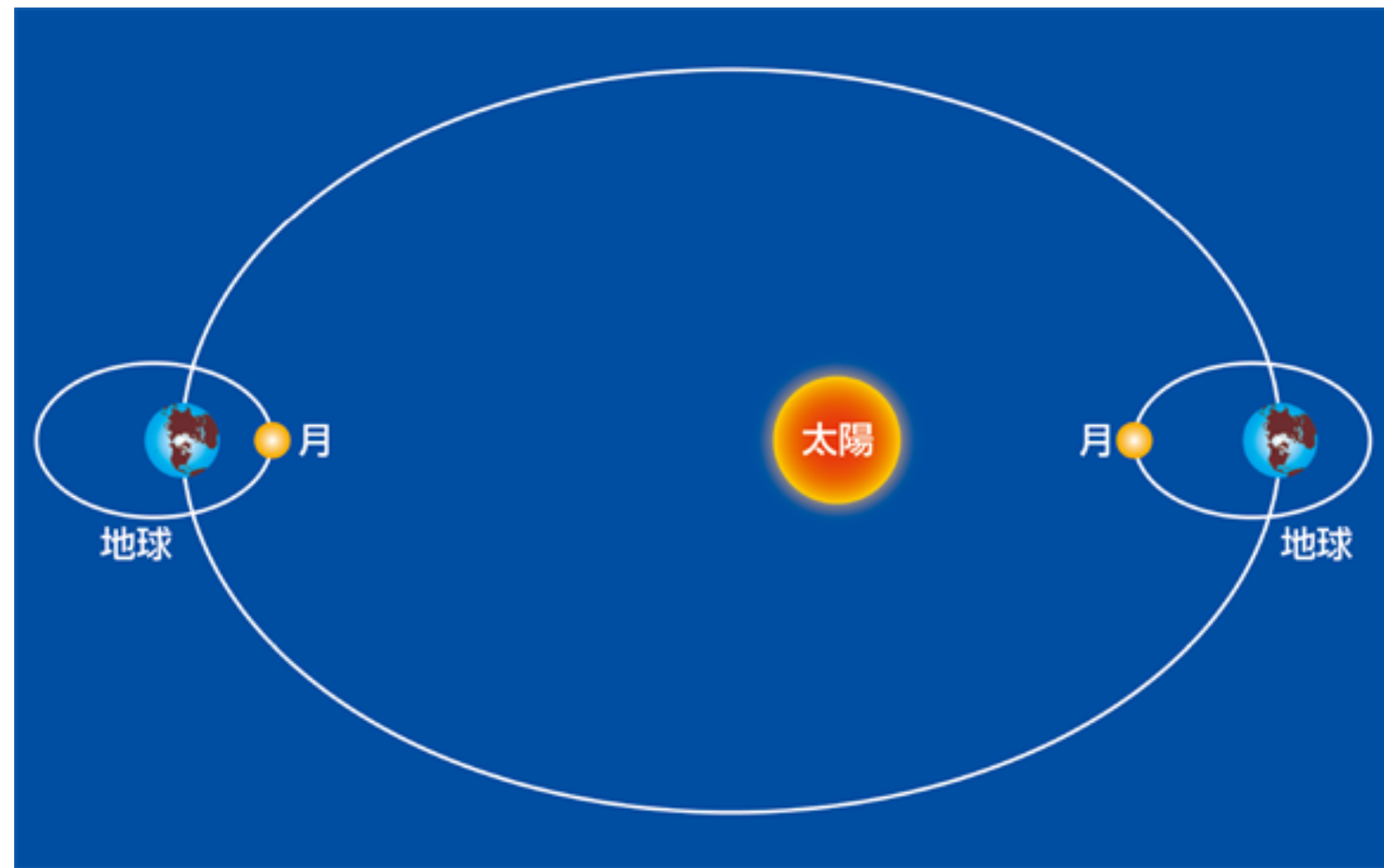
万有引力 = すべてのものは引力で引き合う

「月はどのようにして地球に落下しないのか？」

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



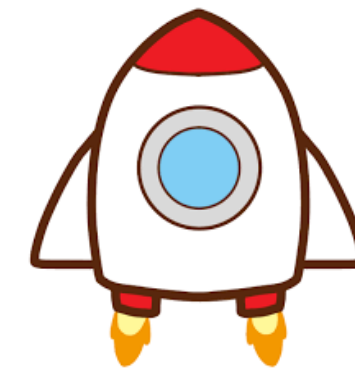
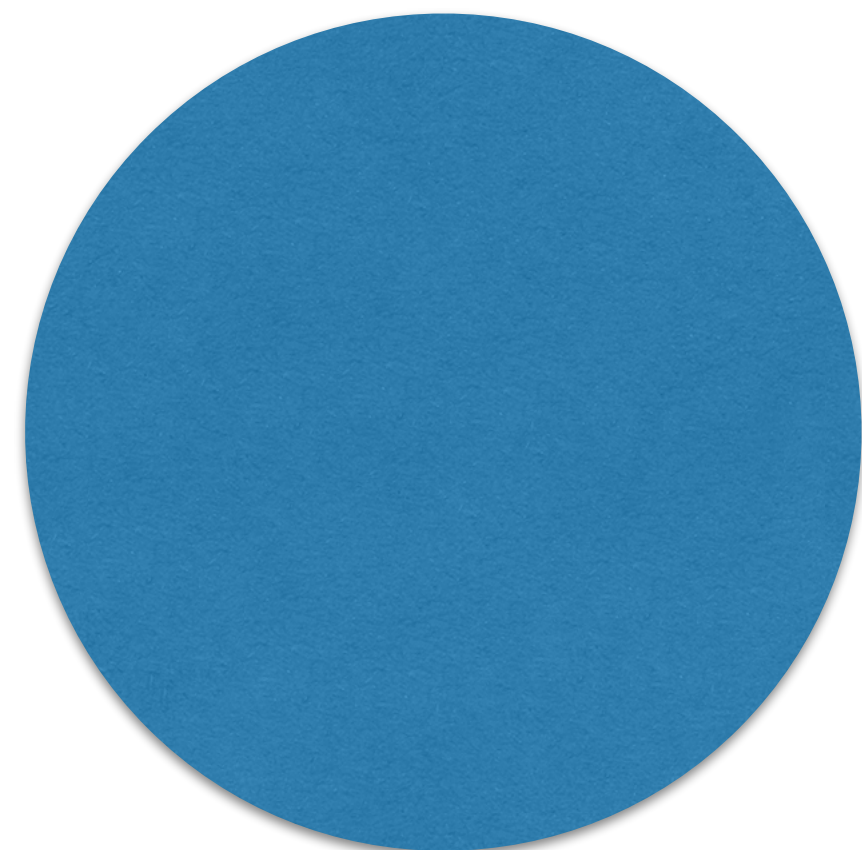
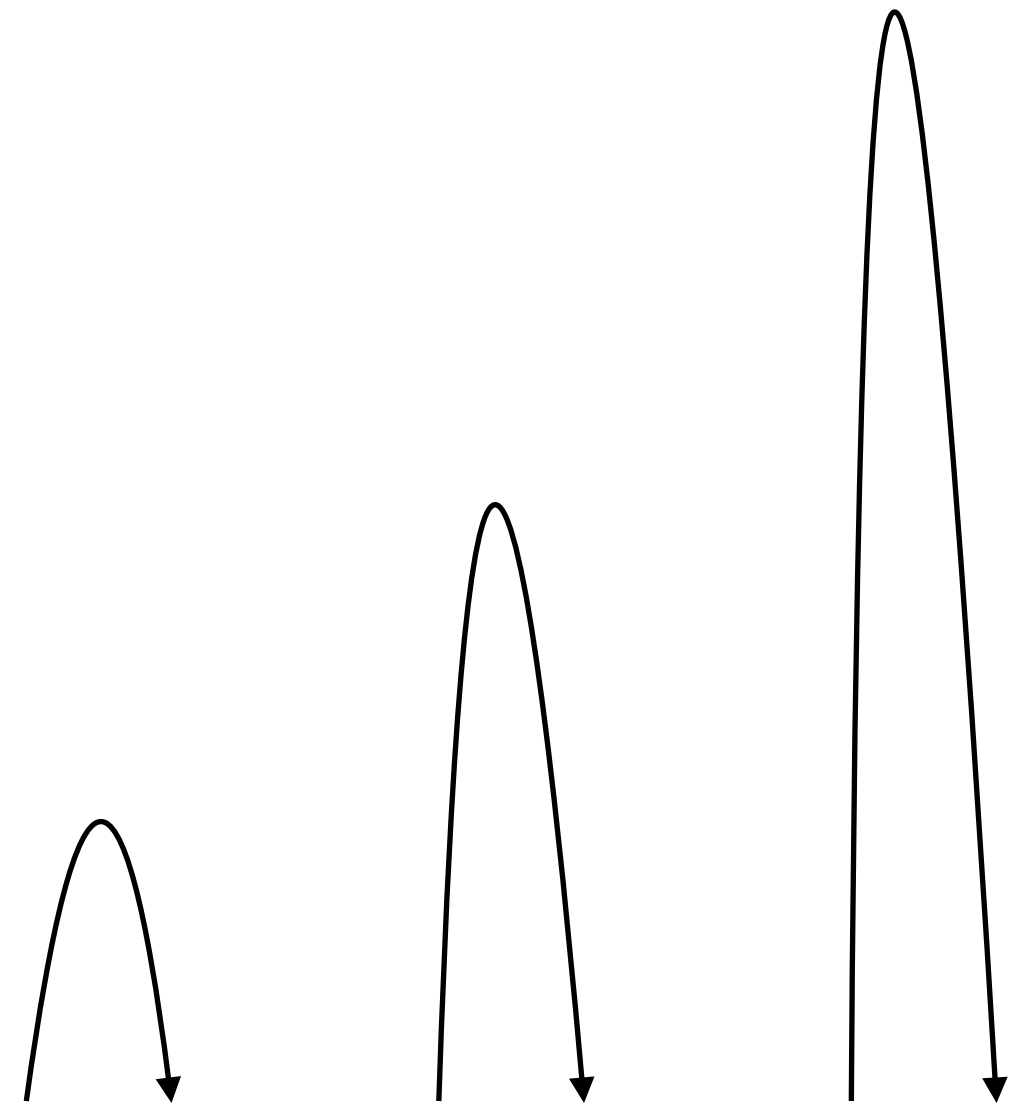
ニュートン
(1642—1727)



「月は落下しつづけているが、
ずっと回っていられる」

脱出速度

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 11 km



光は当然
脱出できる

秒速
30万 km

脱出速度を計算してみよう

脱出速度（星から脱出するのに必要な速度）

$$\begin{aligned}\text{脱出速度の大きさ} &= \sqrt{2gR} = \sqrt{2 \times g \times R} \\ &= \sqrt{2 \times \text{重力加速度（重力の大きさ）} \times \text{地球の半径}}\end{aligned}$$

となるので、地球以外の星でも脱出速度が計算できるよ.

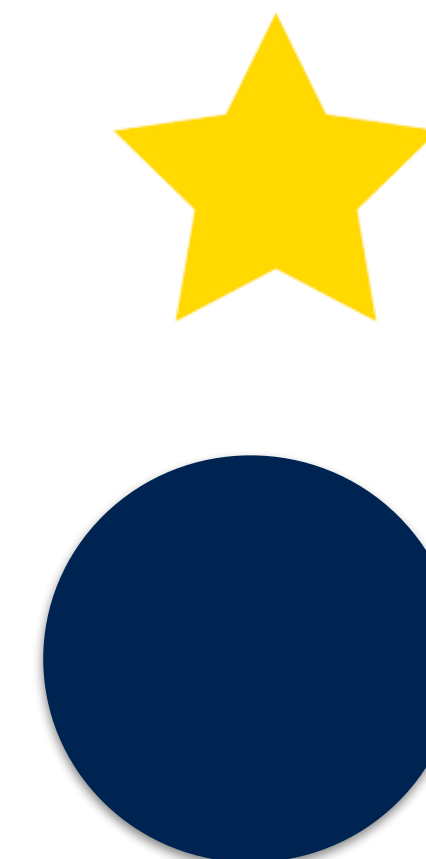
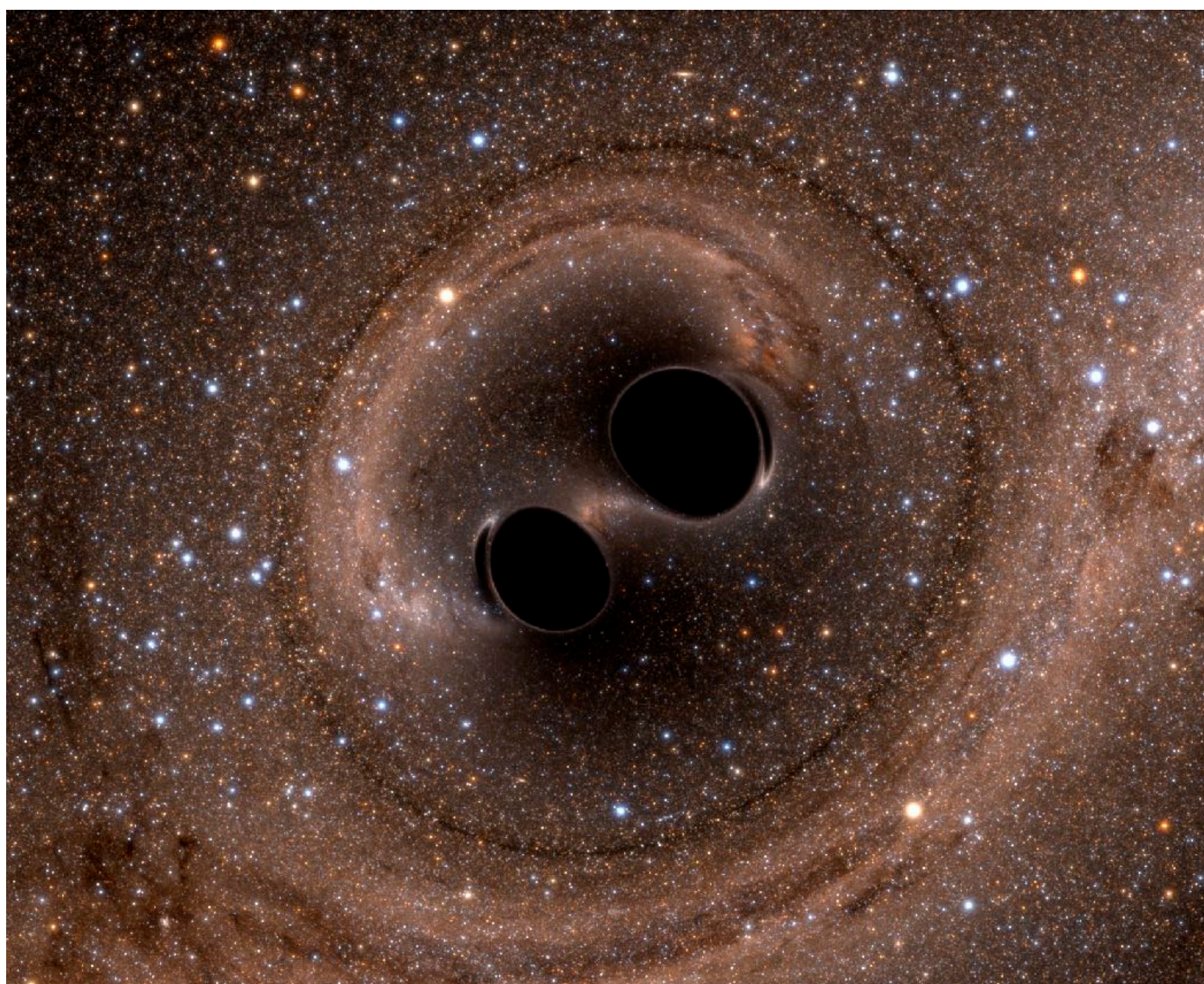
星	重力加速度	地球の何倍か	半径	地球の何倍か	脱出速度	地球の何倍か
地球	9.8 m/s ²	1	6370 km	1	11.1 km/s	1
月	1.6 m/s ²	0.16	1730 km	0.27	2.4 km/s	0.21
火星	3.7 m/s ²	0.38	3390 km	0.53	5.0 km/s	0.45
木星	25.8 m/s ²	2.62	69900 km	11	60 km/s	5.37
土星	11.1 m/s ²	1.13	58200 km	9.1	36 km/s	3.22
太陽	271 m/s ²	27.6	700000 km	110	615 km/s	55.1

脱出速度が光の速さを超えたら・・・

とてつもなく重くて小さな天体では

光も
脱出できない

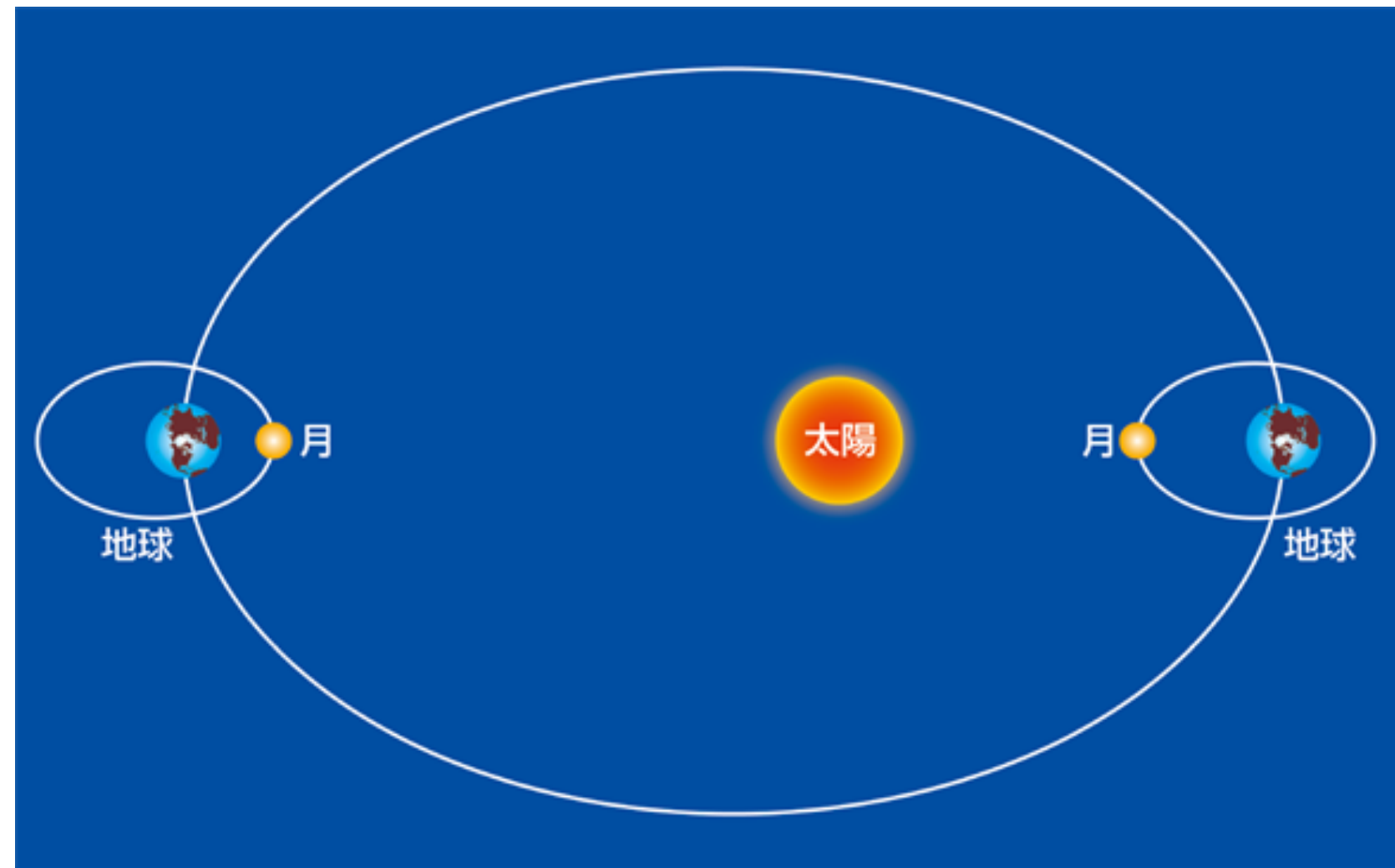
秒速
30万 km



◀ブラックホール
(シミュレーション)

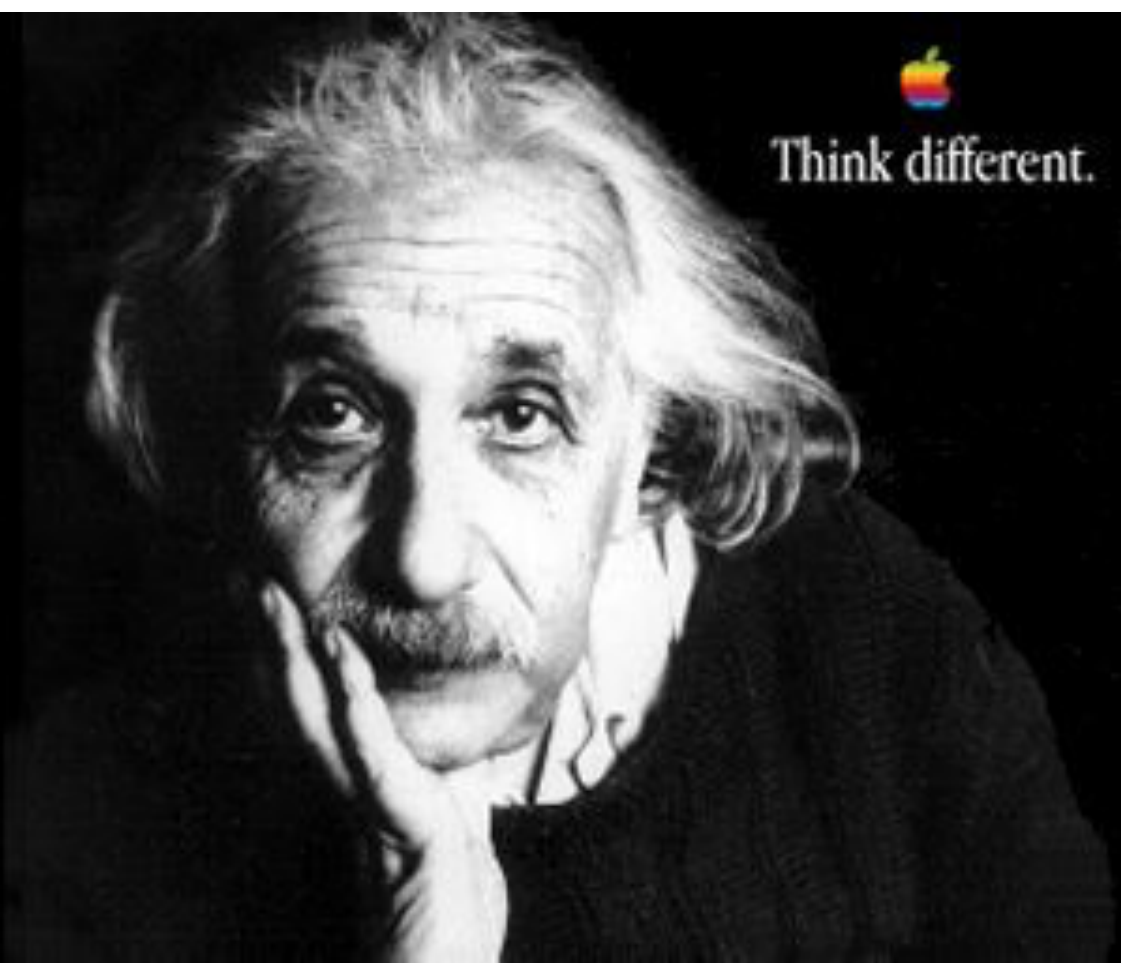
重力の正体は？

万有引力 $F = G \frac{Mm}{r^2}$
=すべてのものは引力で引き合う



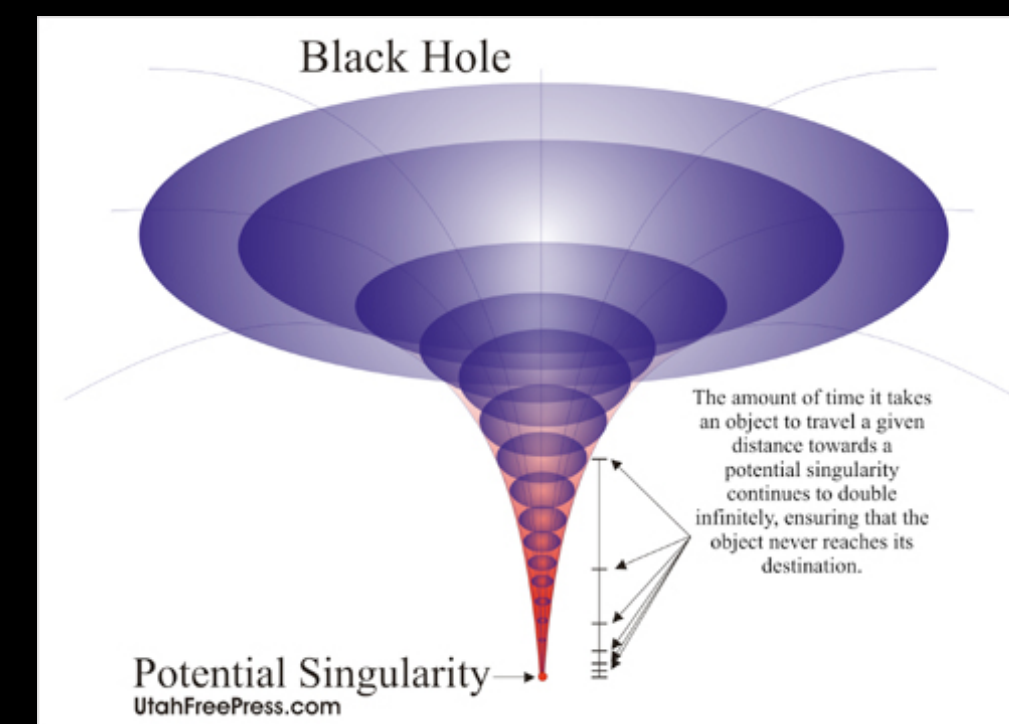
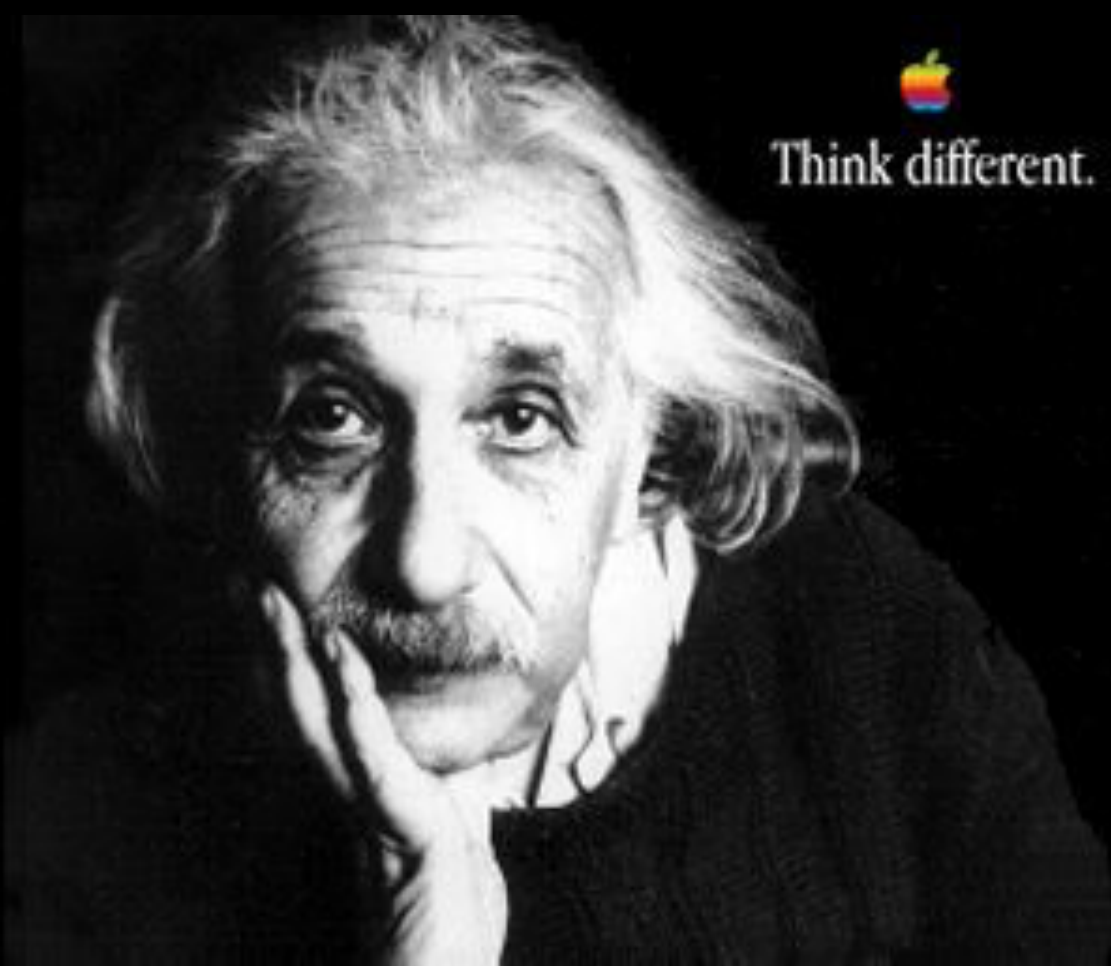
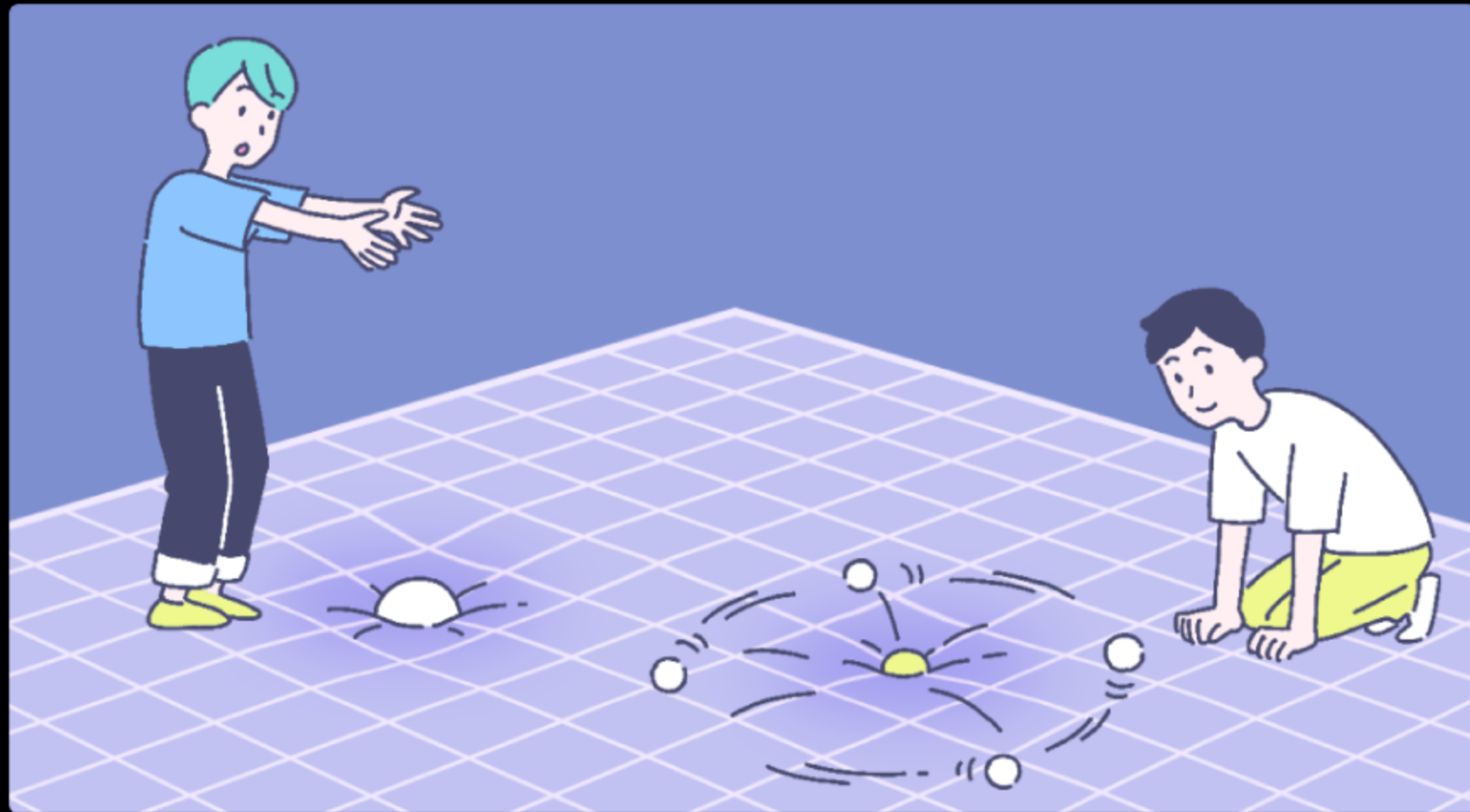
ニュートン

アインシュタイン

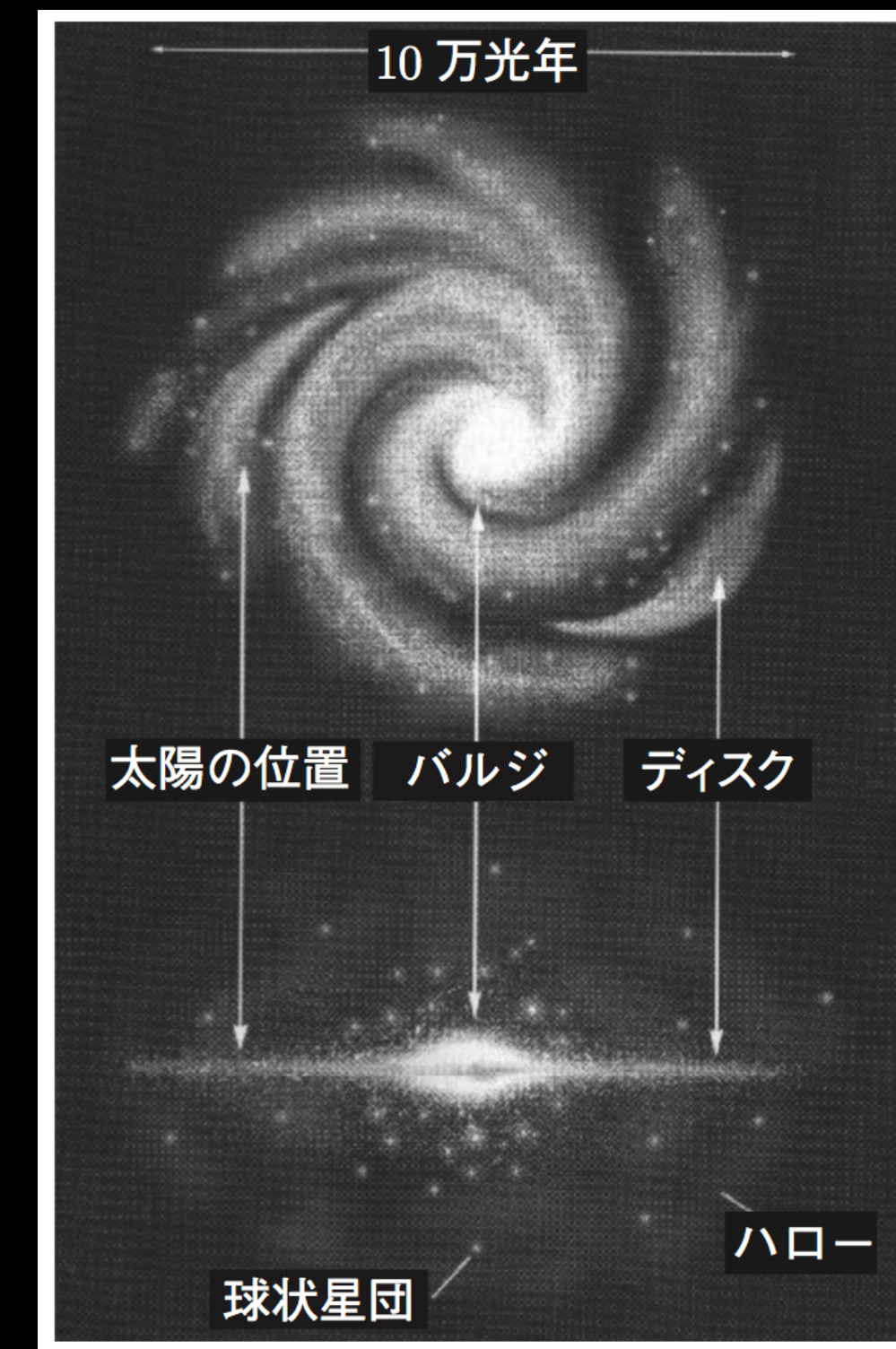
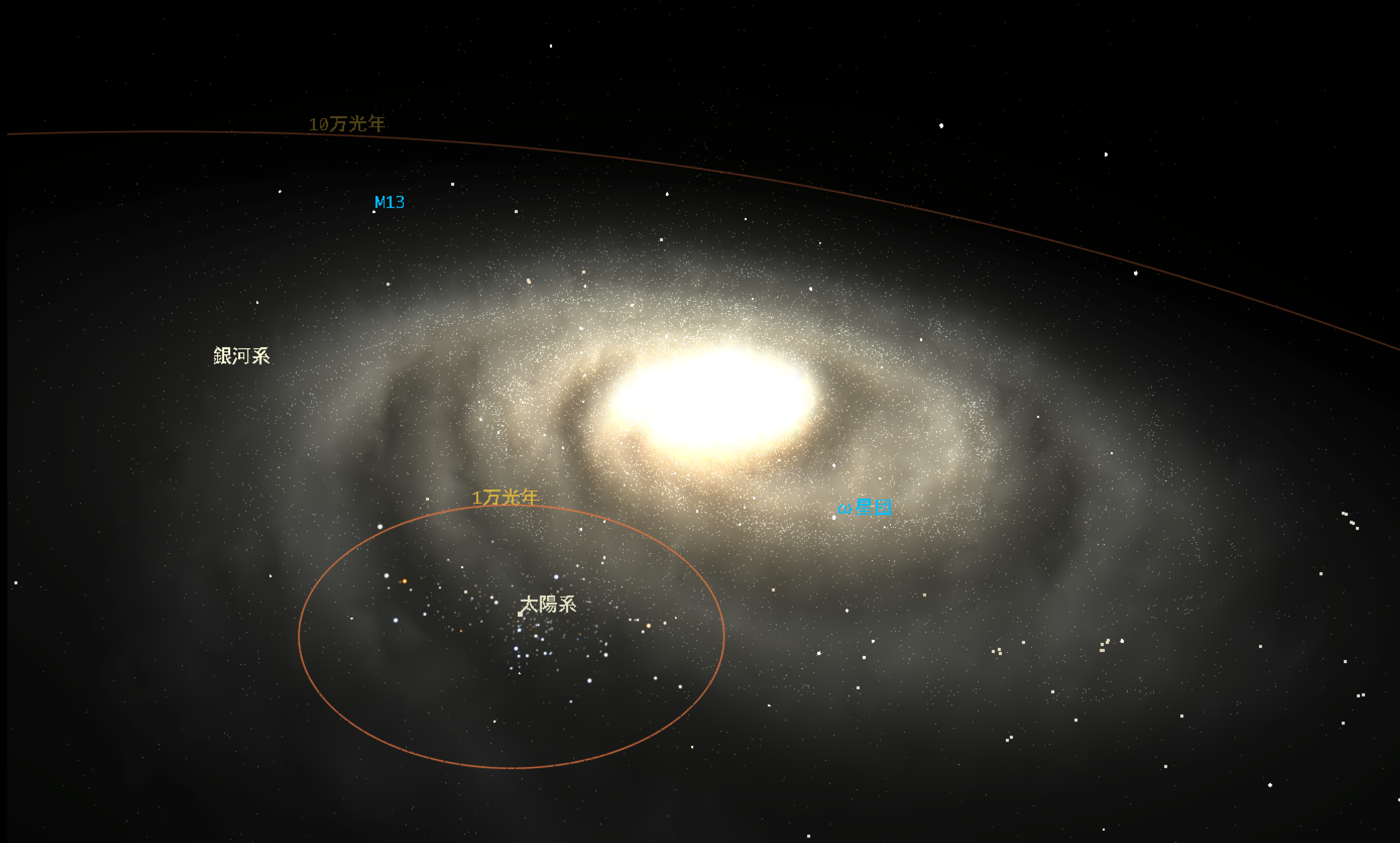


ちがうよ。重力は、時空のゆがみだよ。

アインシュタインは、
時間と空間は、伸び縮みするものだと考えた。



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



いて座

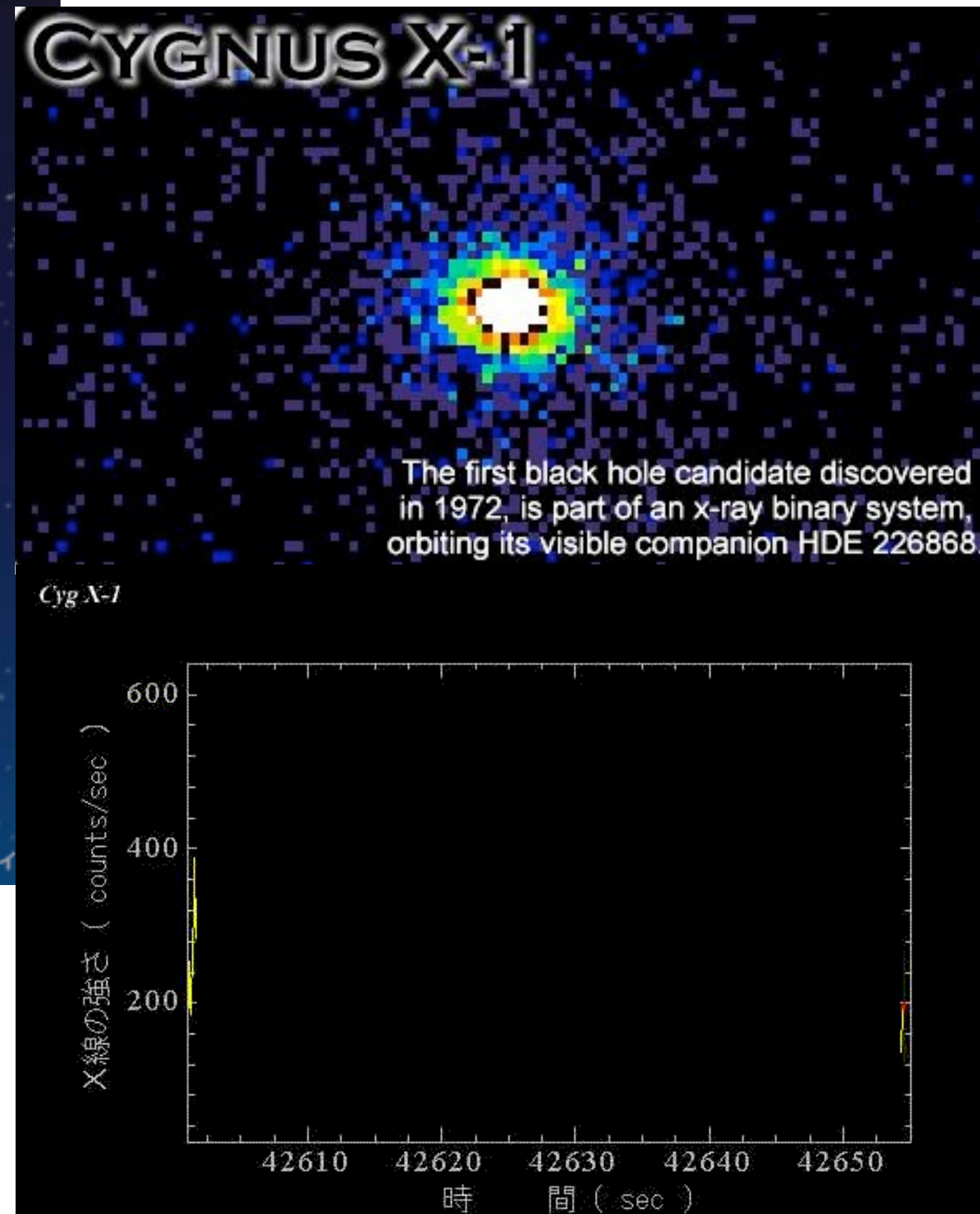
さそり座



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？

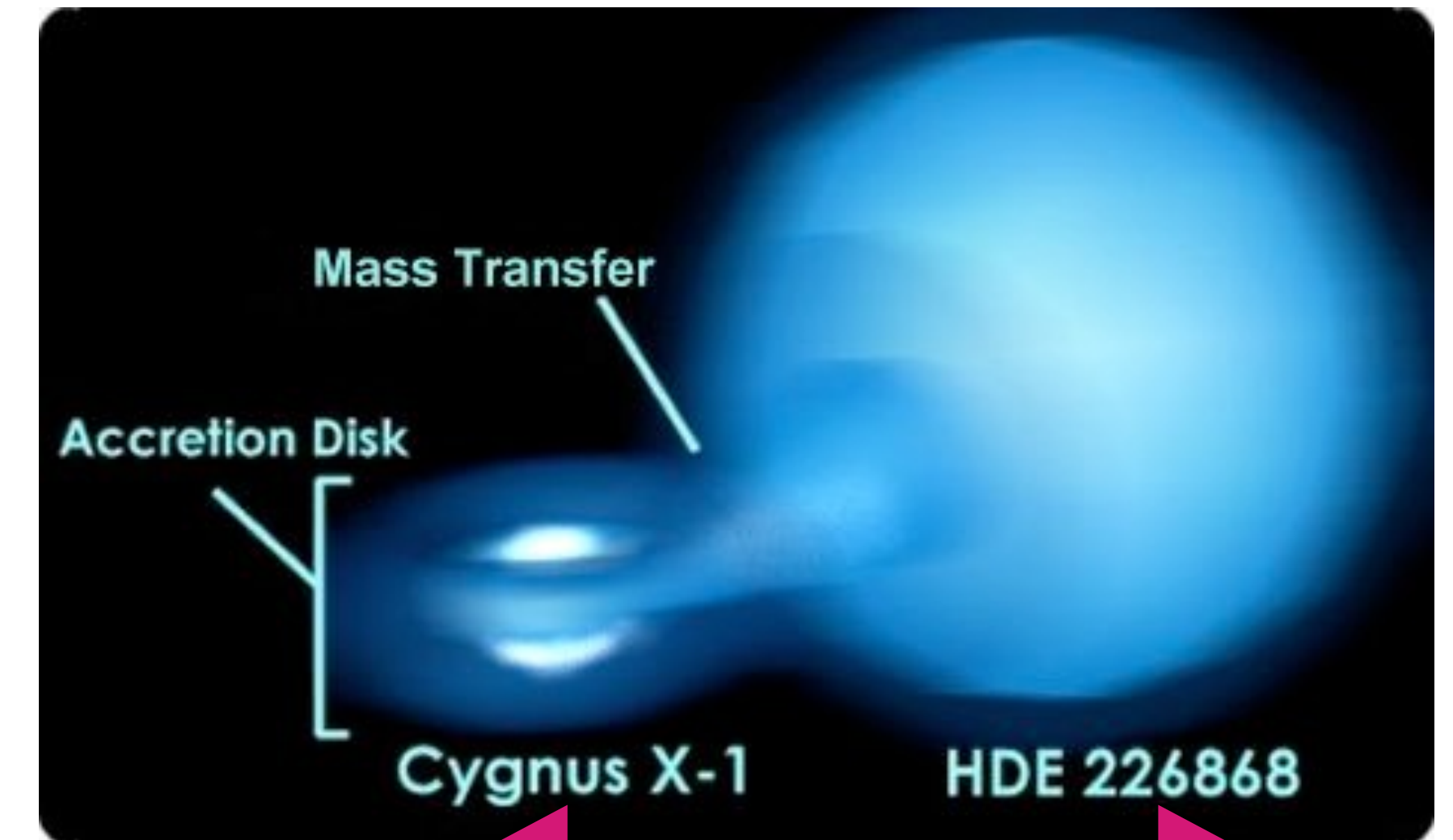


6000光年先



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

想像図



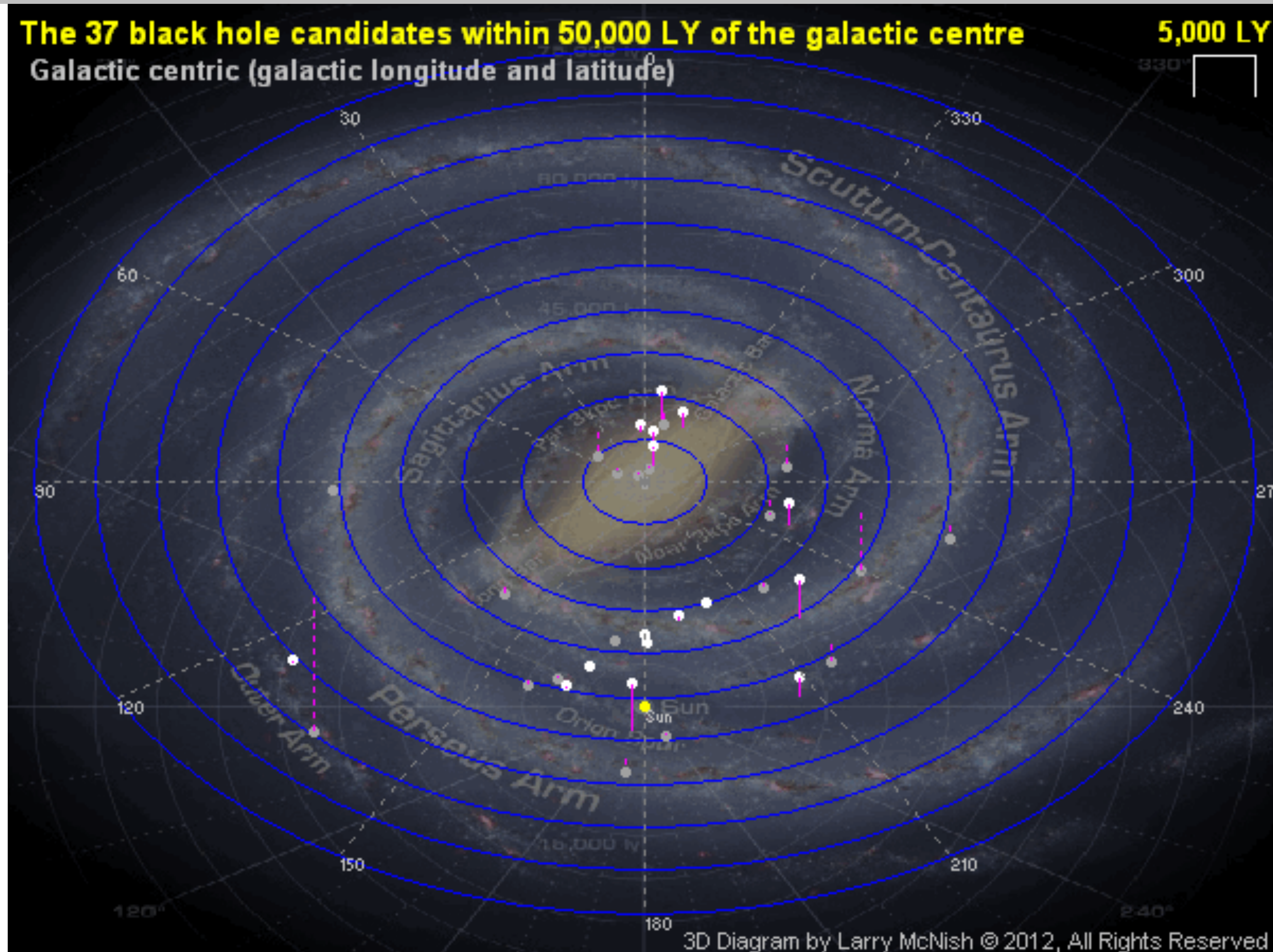
光の速さで1秒以下
(地球7.5周以下)
質量は太陽の10倍以上

重くて小さな天体

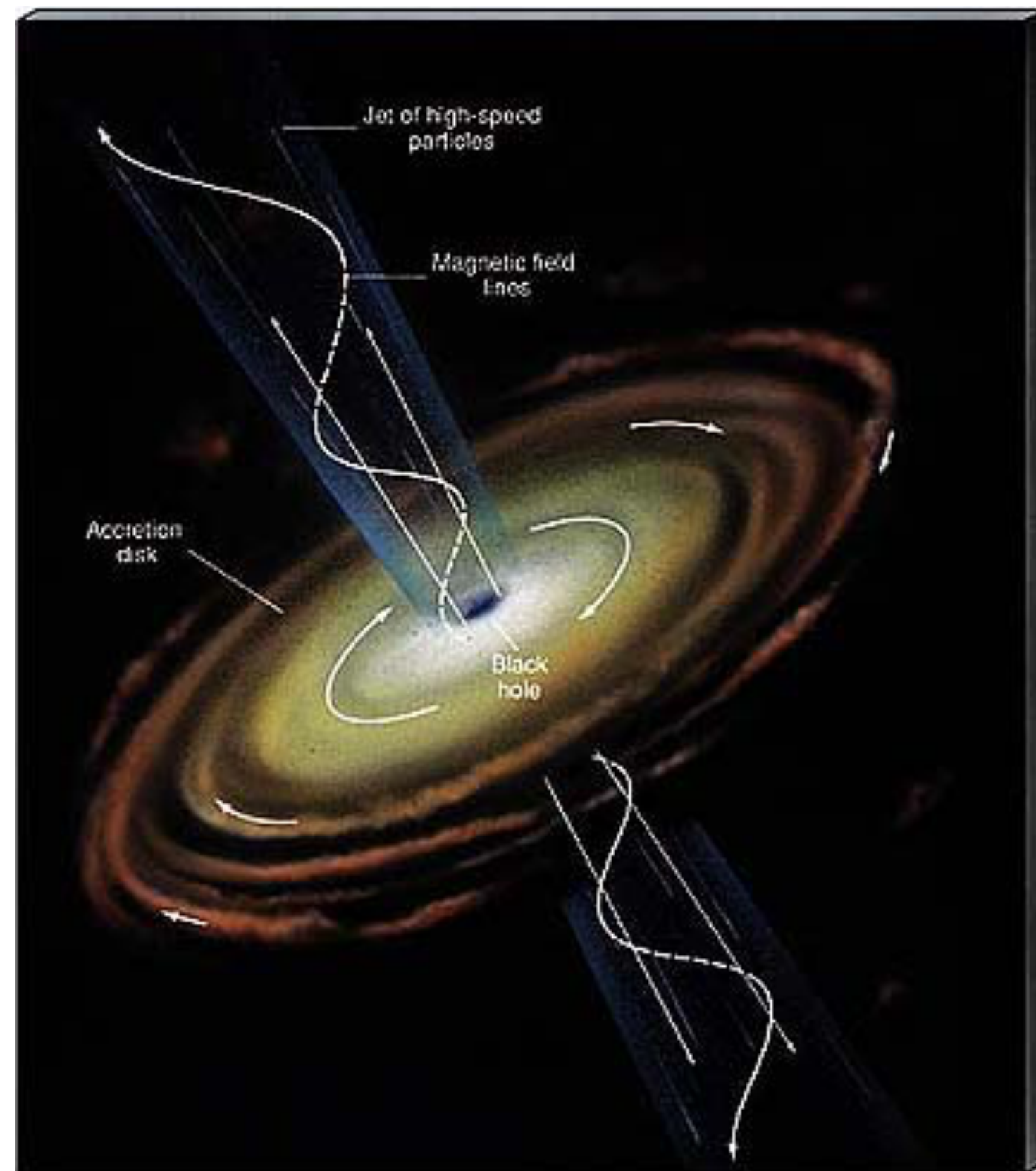
はくちょう座 X-1 はブラックホール

ブラックホール候補天体は50以上

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



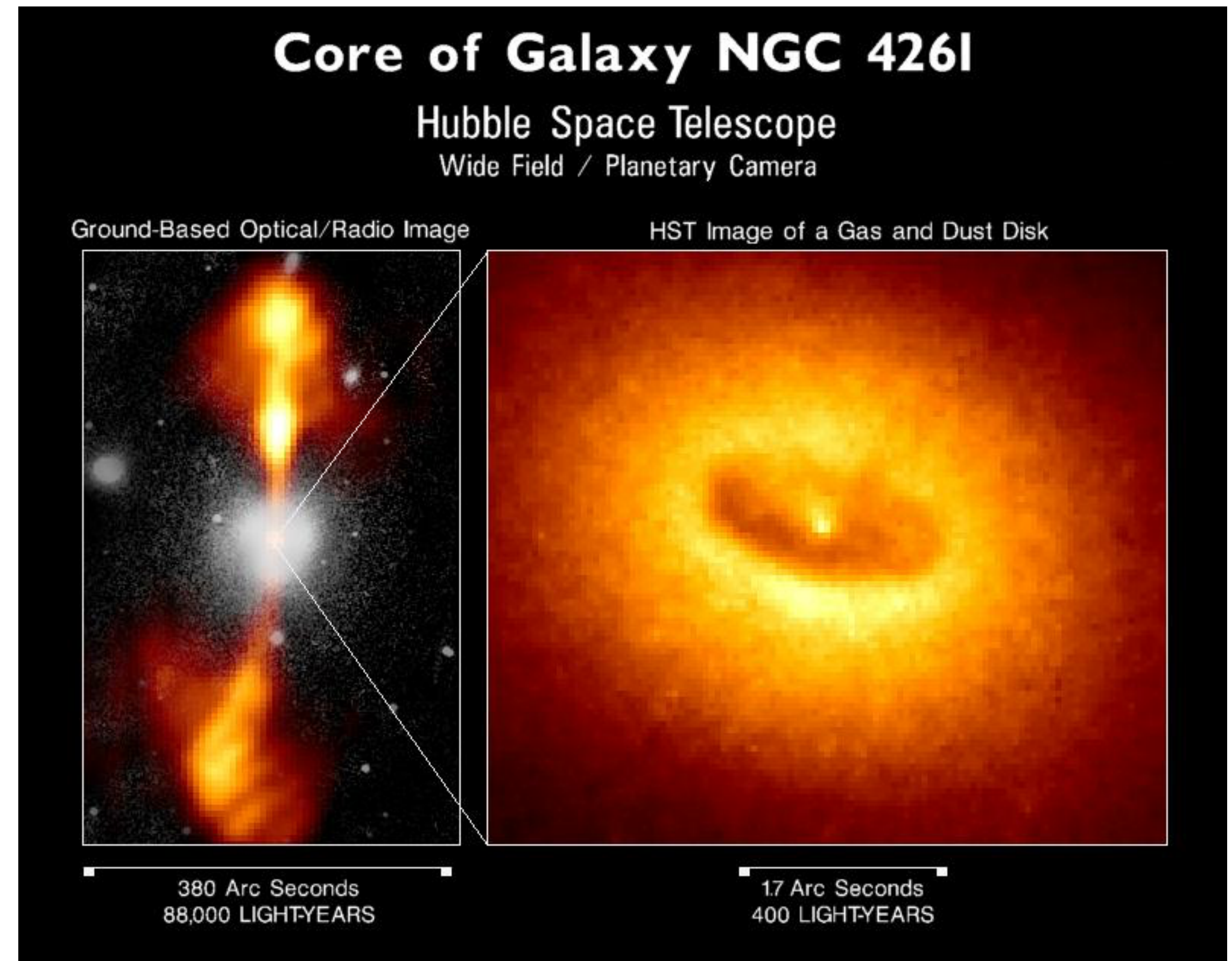
ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？



<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

はくちょう座



こと座



へびつかい座



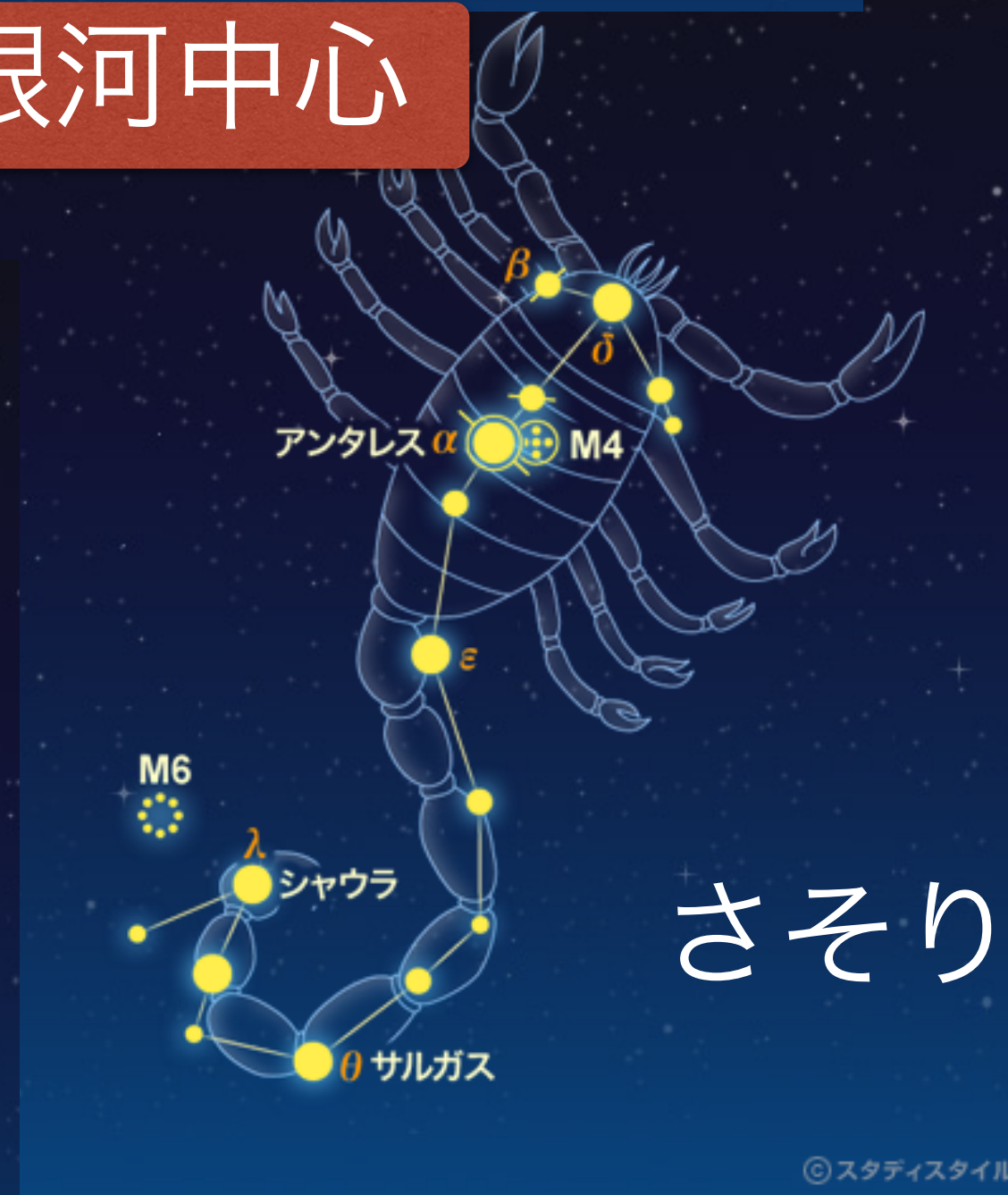
わし座



銀河中心



いて座



さそり座

銀河中心に向かってズームイン

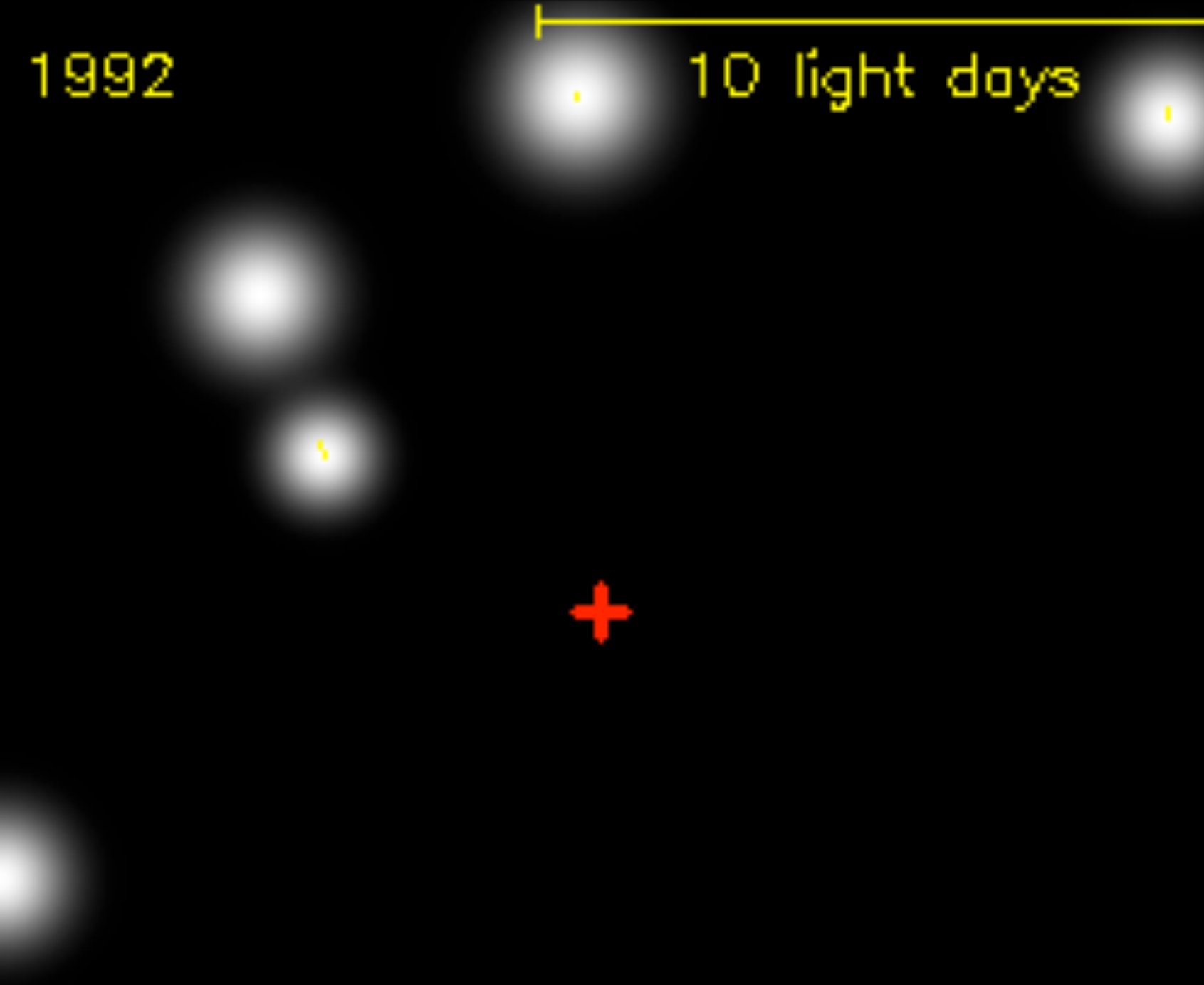
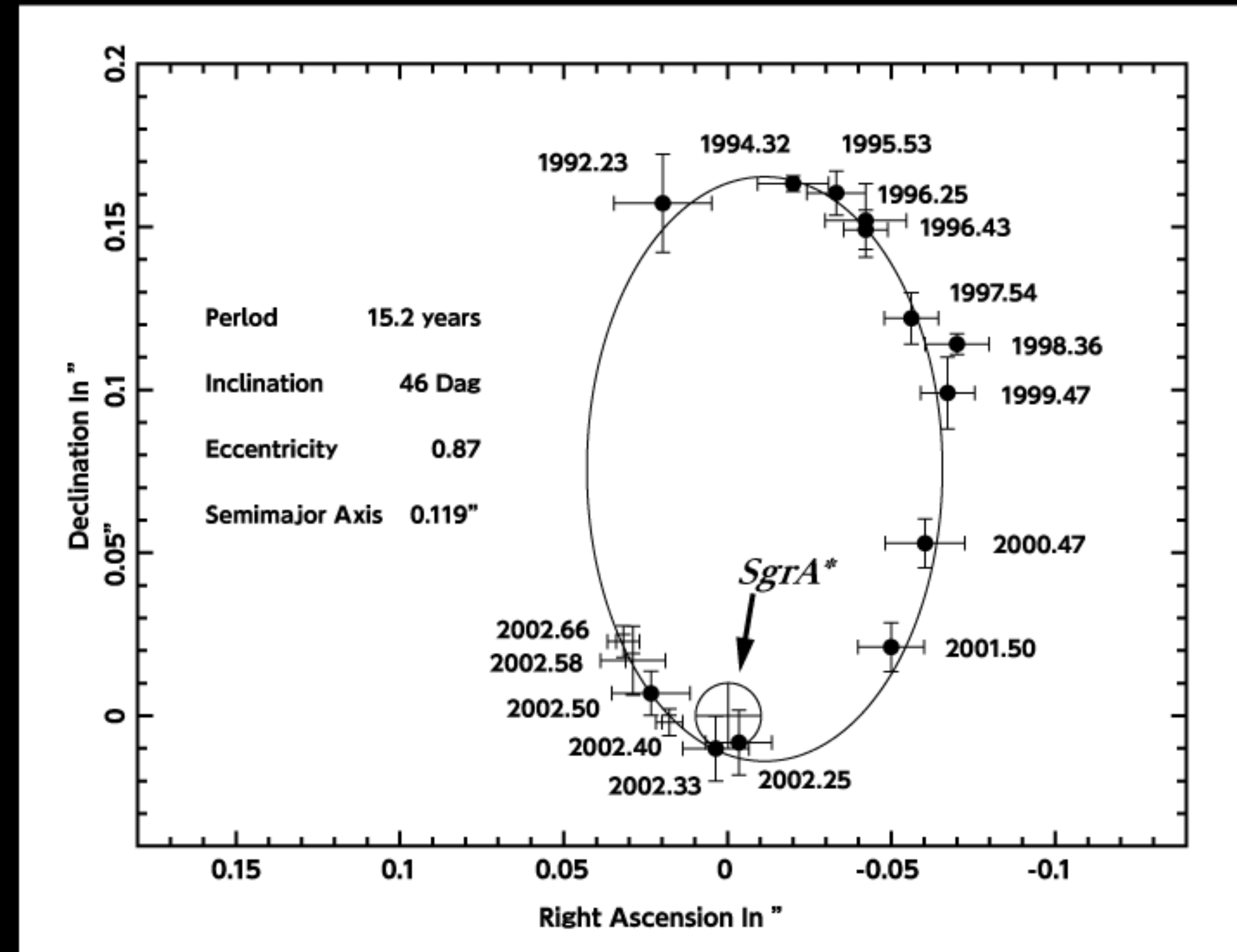
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



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」

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

★何でも吸い込む。光も脱出できない重い星

★大きな恒星が燃え尽きた最後の姿

★アインシュタインの相対性理論が予言

★天文学では「明るい天体」 （エネルギー源）

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

2. 見えないはずでは？

★ まわりのガスや天体の動きから

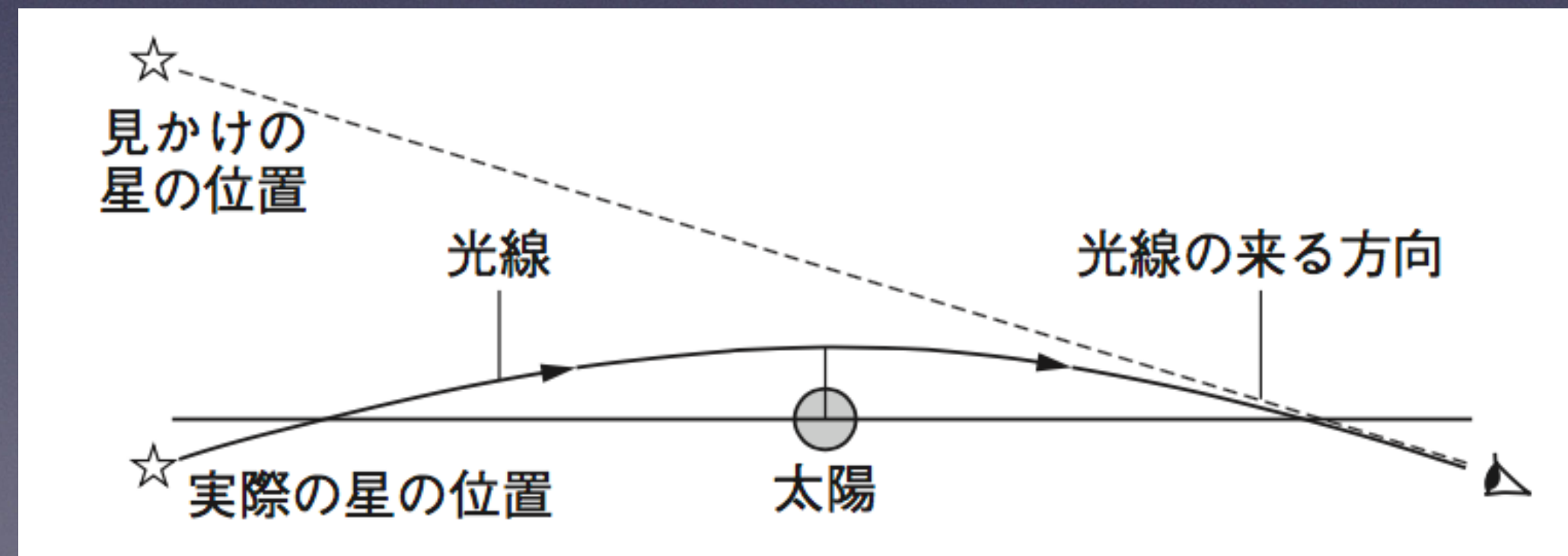
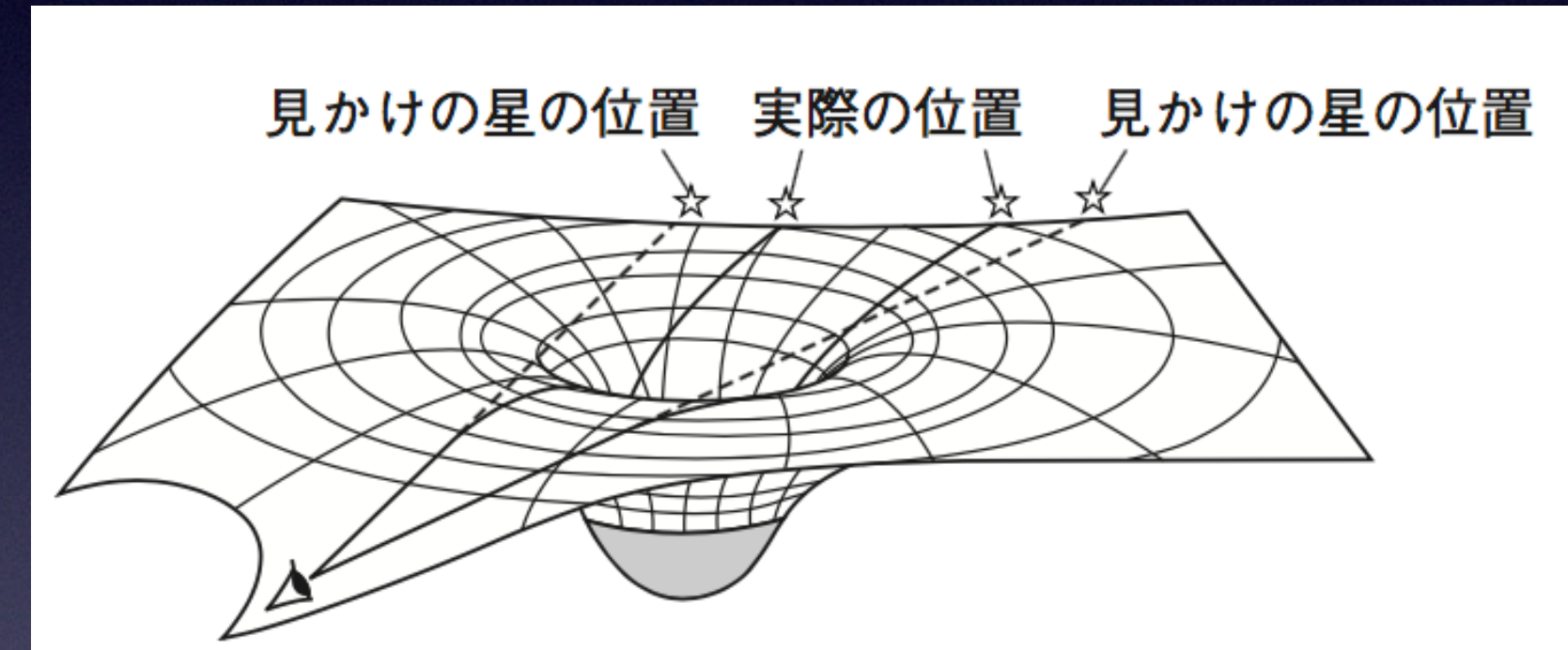
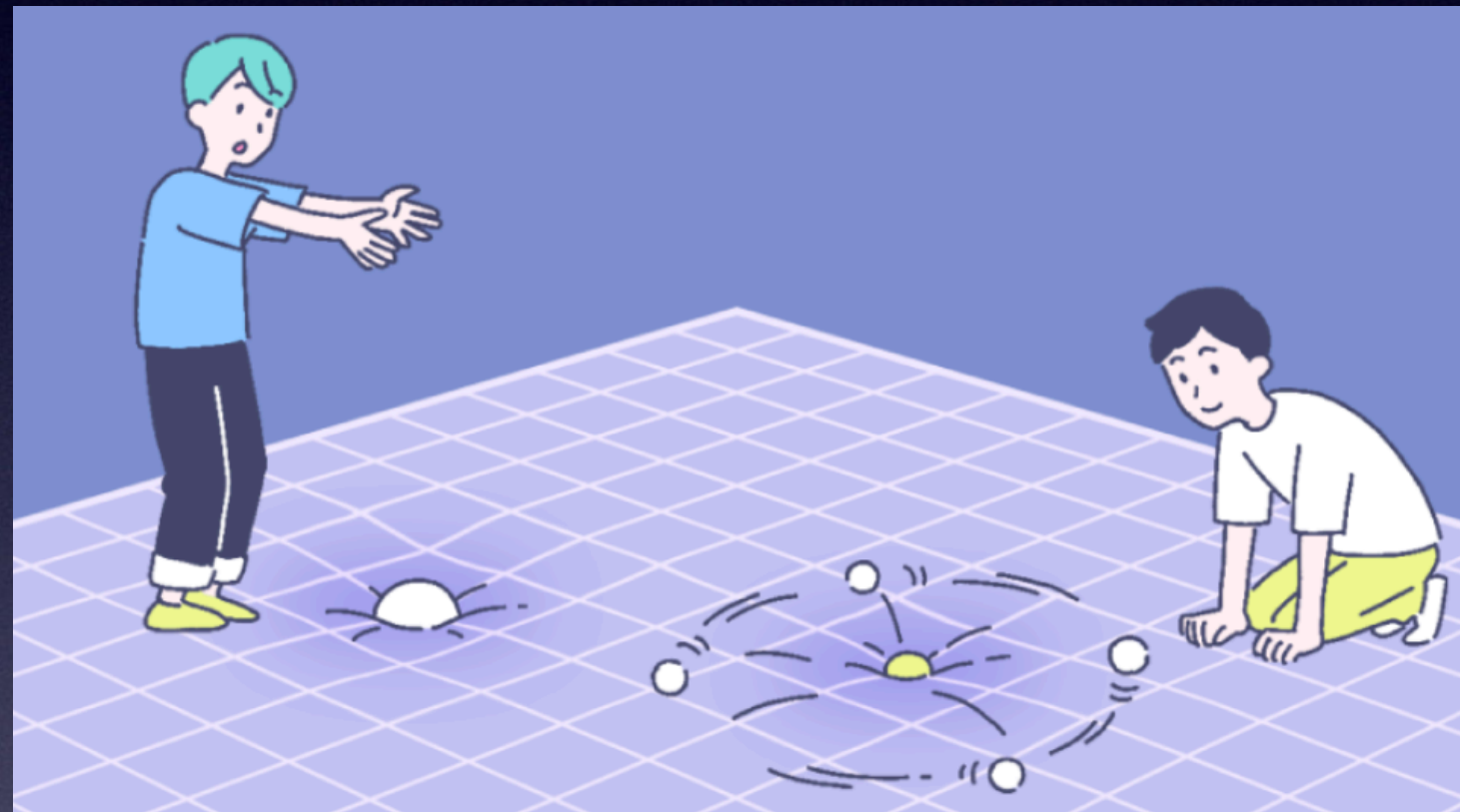
ブラックホールの存在がわかる！

★ ブラックホールの近くでは光も曲がって進む

(重力レンズ)

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが、重い天体の周りでは、
時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



1919年、エディントンが、
皆既日食を利用して、光の
曲がりを確認（0.875秒角）

Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

**LIGHTS ALL ASKEW
IN THE HEAVENS**

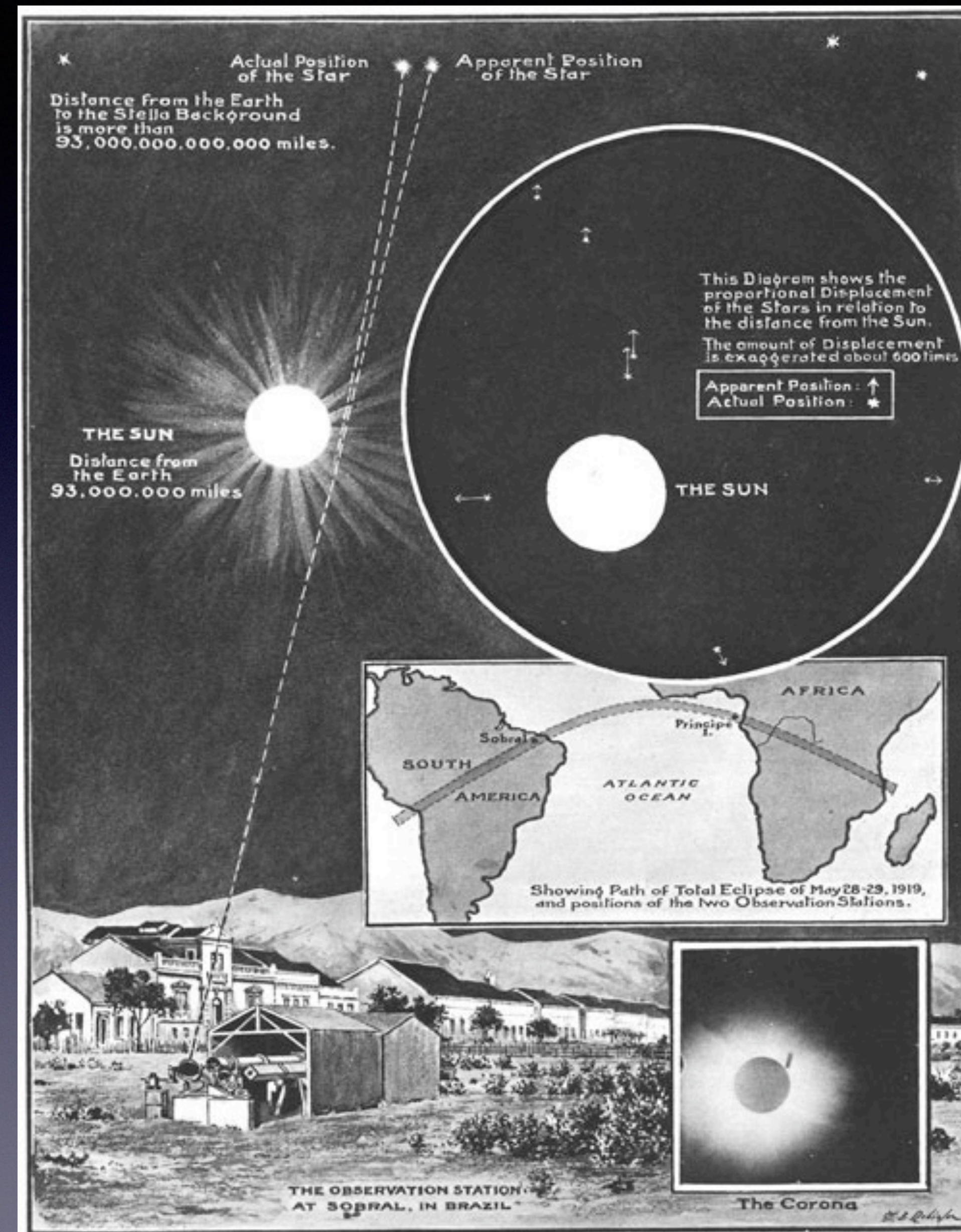
**Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.**

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

**Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.**

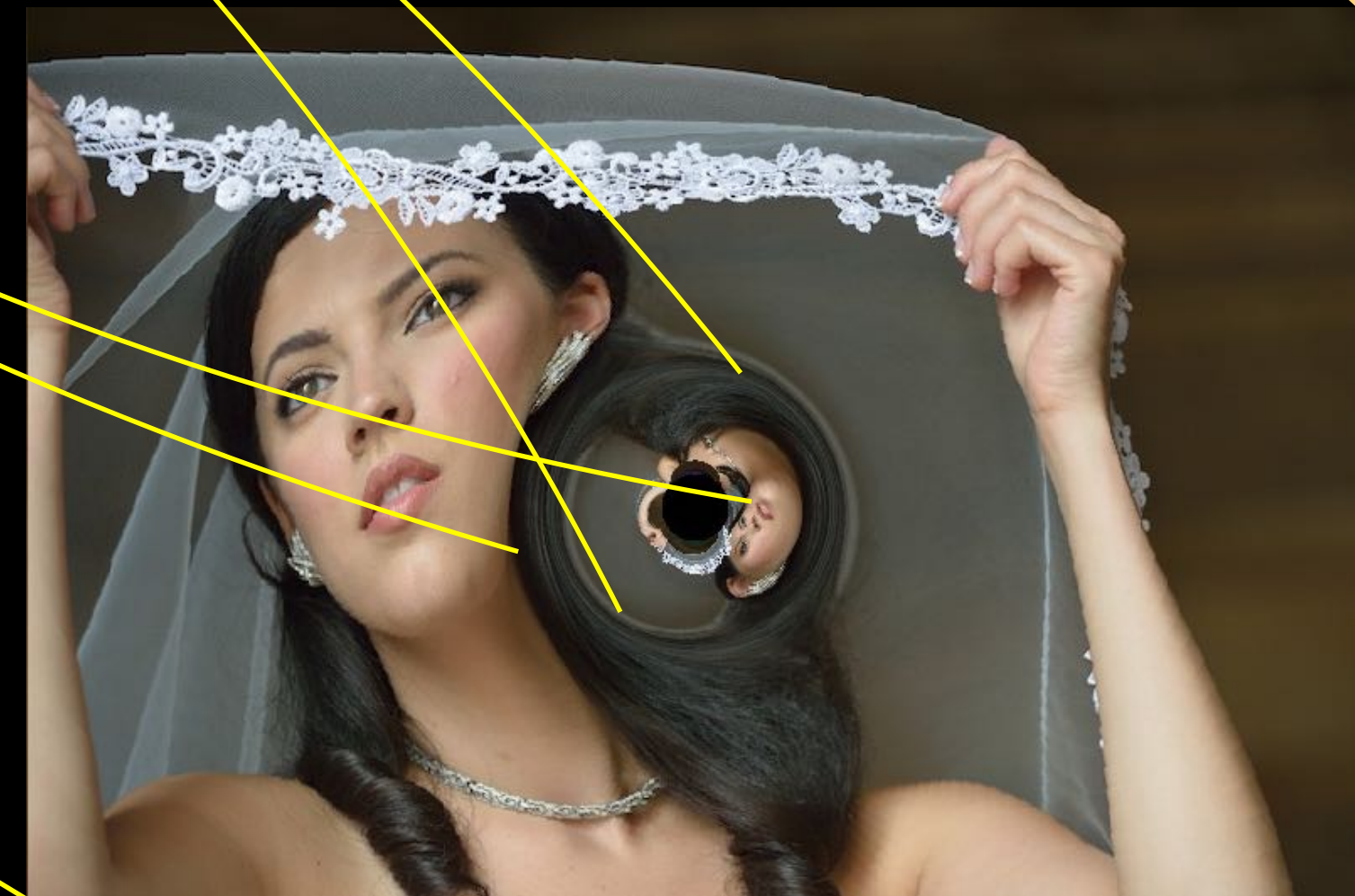
A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.





ブラックホールの周りで
光は曲がる



<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/temp/PhotoWithBH/index.html>

sample trial page (please do not link)



ブラックホールと写真を撮ろう

30秒ごとに撮影するよ

下のダイヤルでブラックホールの大き
さを変えられるよ

タッチパネルでブラックホールを移動
できるよ



This was most popular, and Akashi & Yokohama decided to display this as the standard contents (under the contraction with NMNS Taiwan).

一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

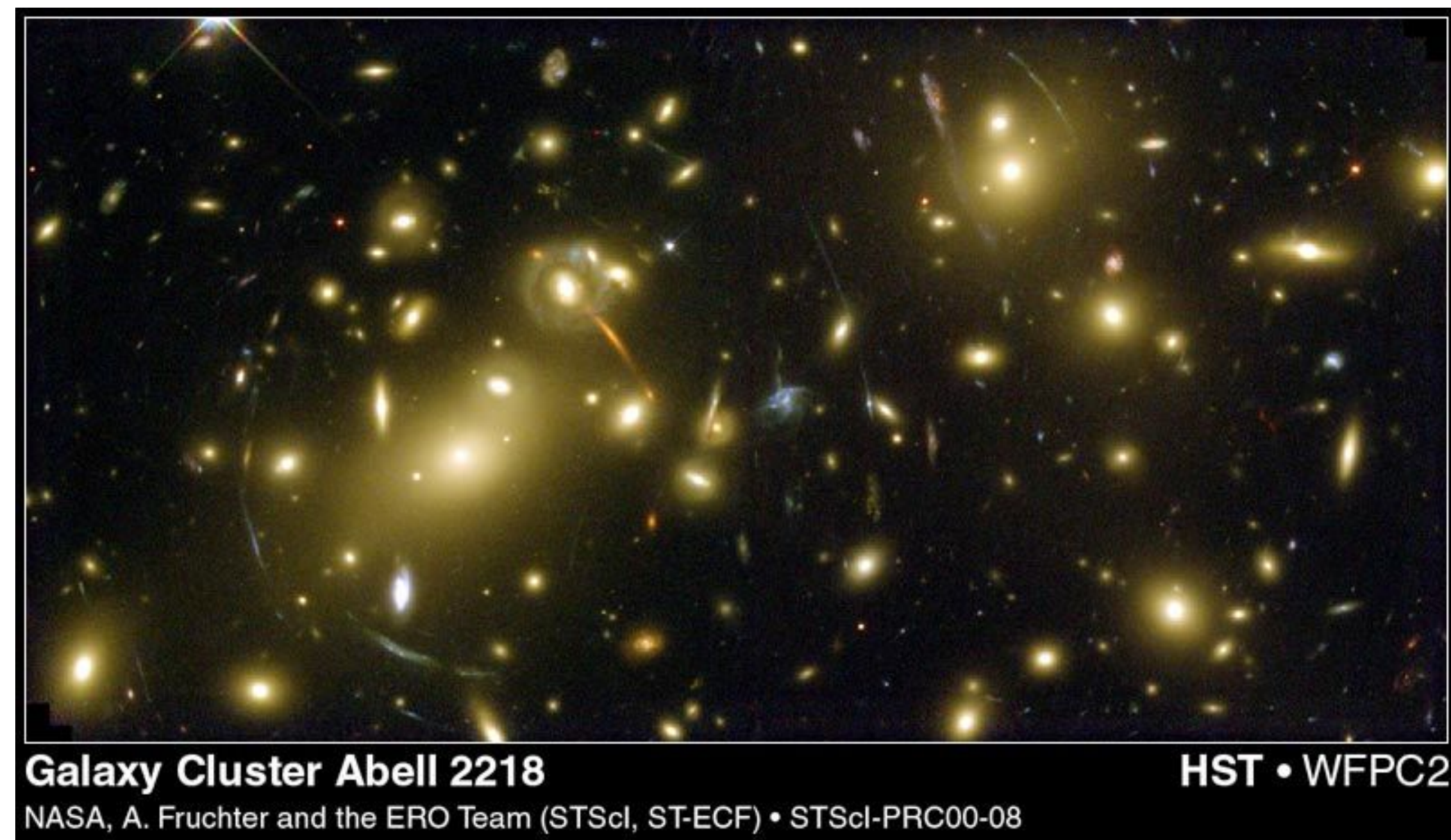
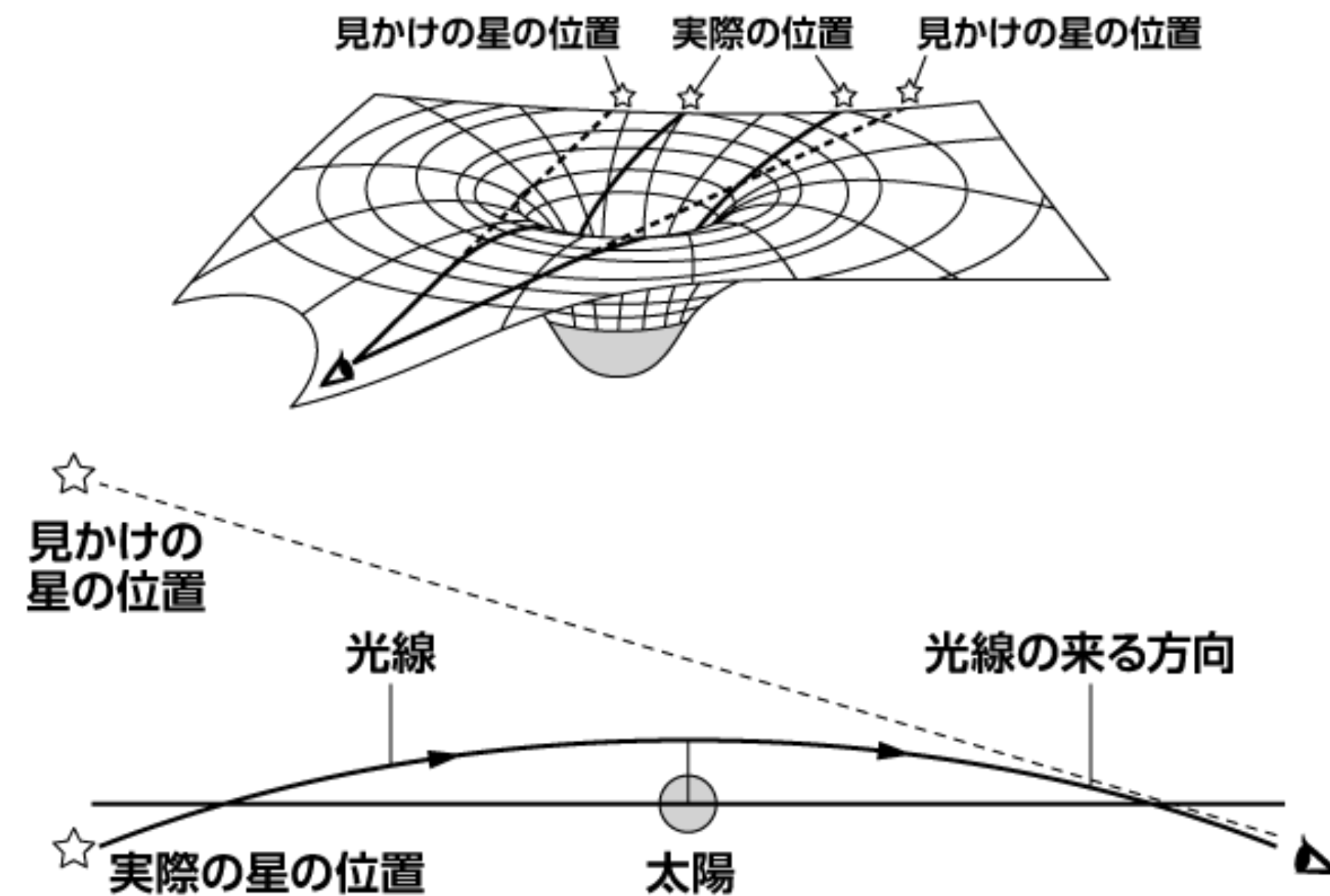
- 重力によってゆがんだ空間では 光の経路も曲がる



James Webb 望遠鏡のファーストライト
2022年7月発表の写真 SMACS0723

<https://www.nasa.gov/webbfirstimages>

重力レンズ効果として観測される▶



提供 NASA

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

M87銀河の中心にあるブラックホール

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

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像



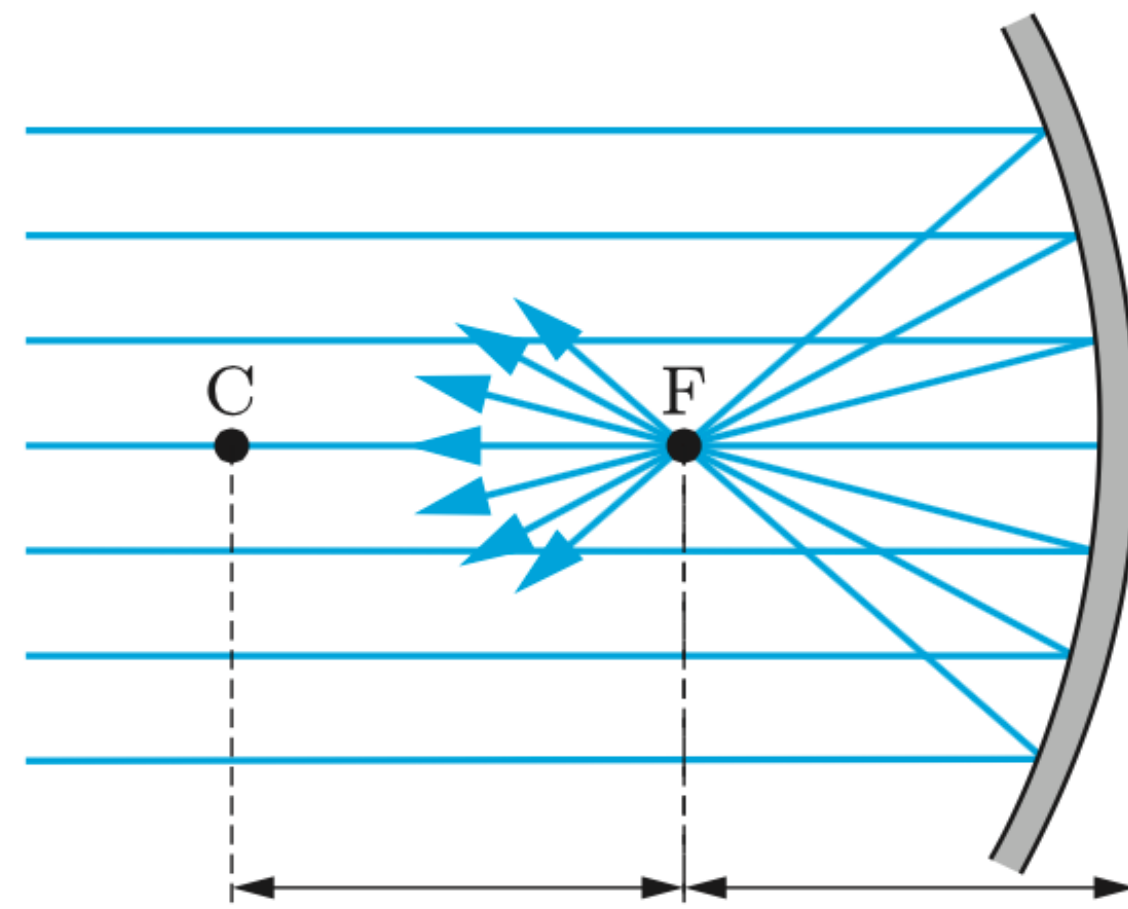
<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-ehl/videos.html>

0'58"

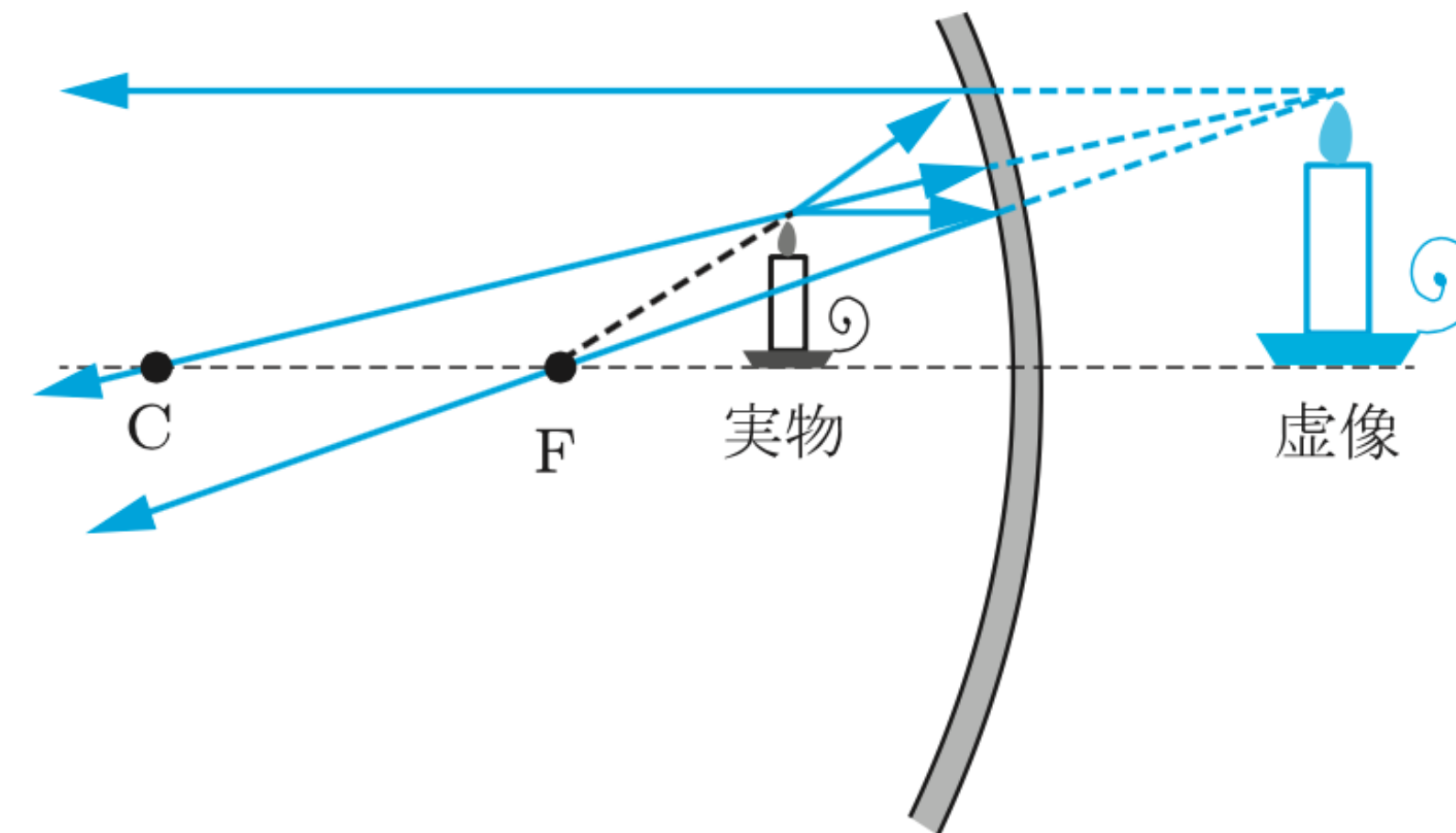
concave mirror

凹面鏡による像

平行光線は焦点Fに集まる



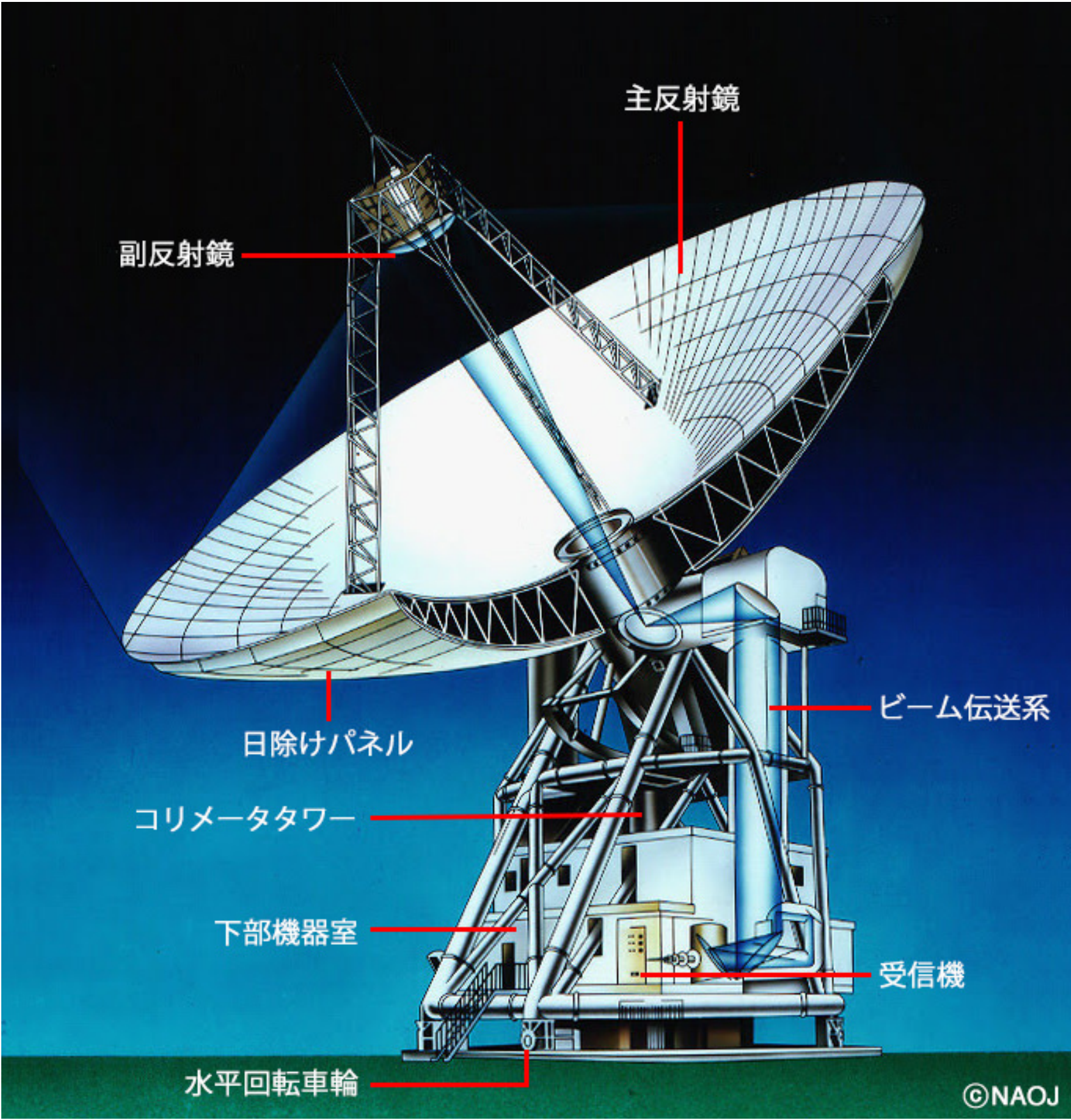
(a) 平行光線を当てると焦点に集光する



(b) 焦点より内側に置いた物体の像は拡大されて映る



電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い, 分解能高い



分解能＝波長/口径

野辺山45m望遠鏡

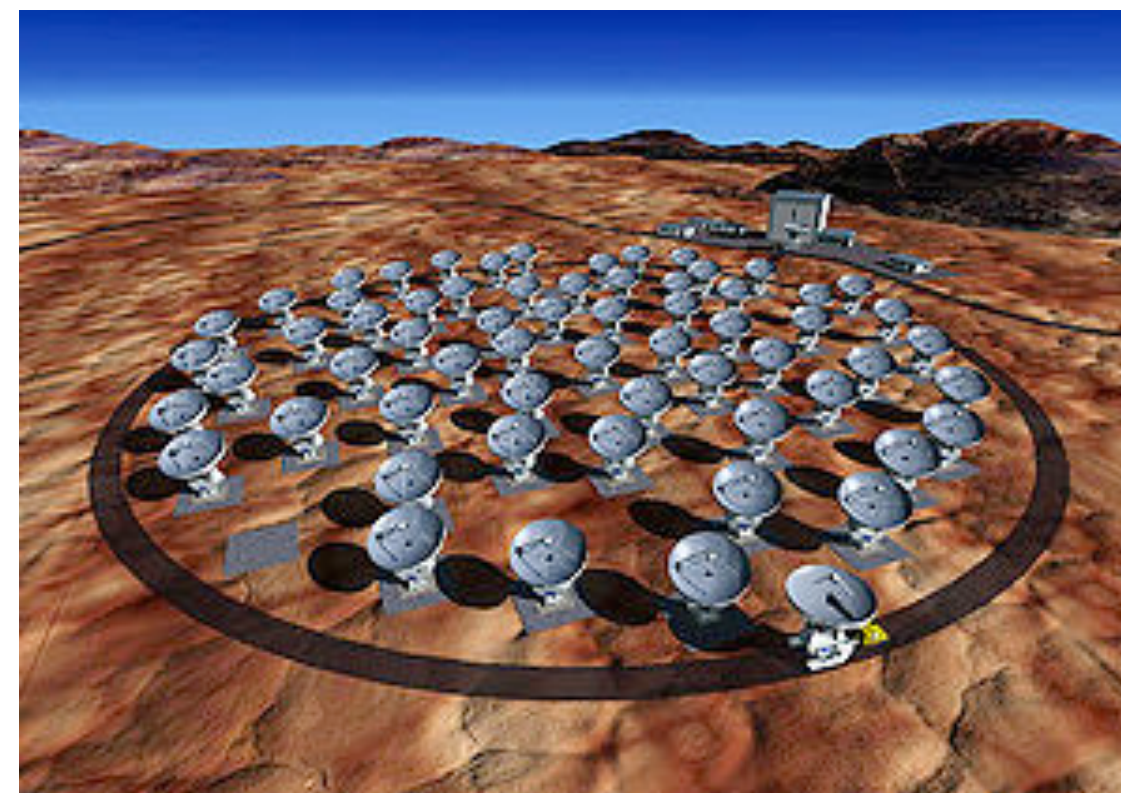
日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

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。



「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」

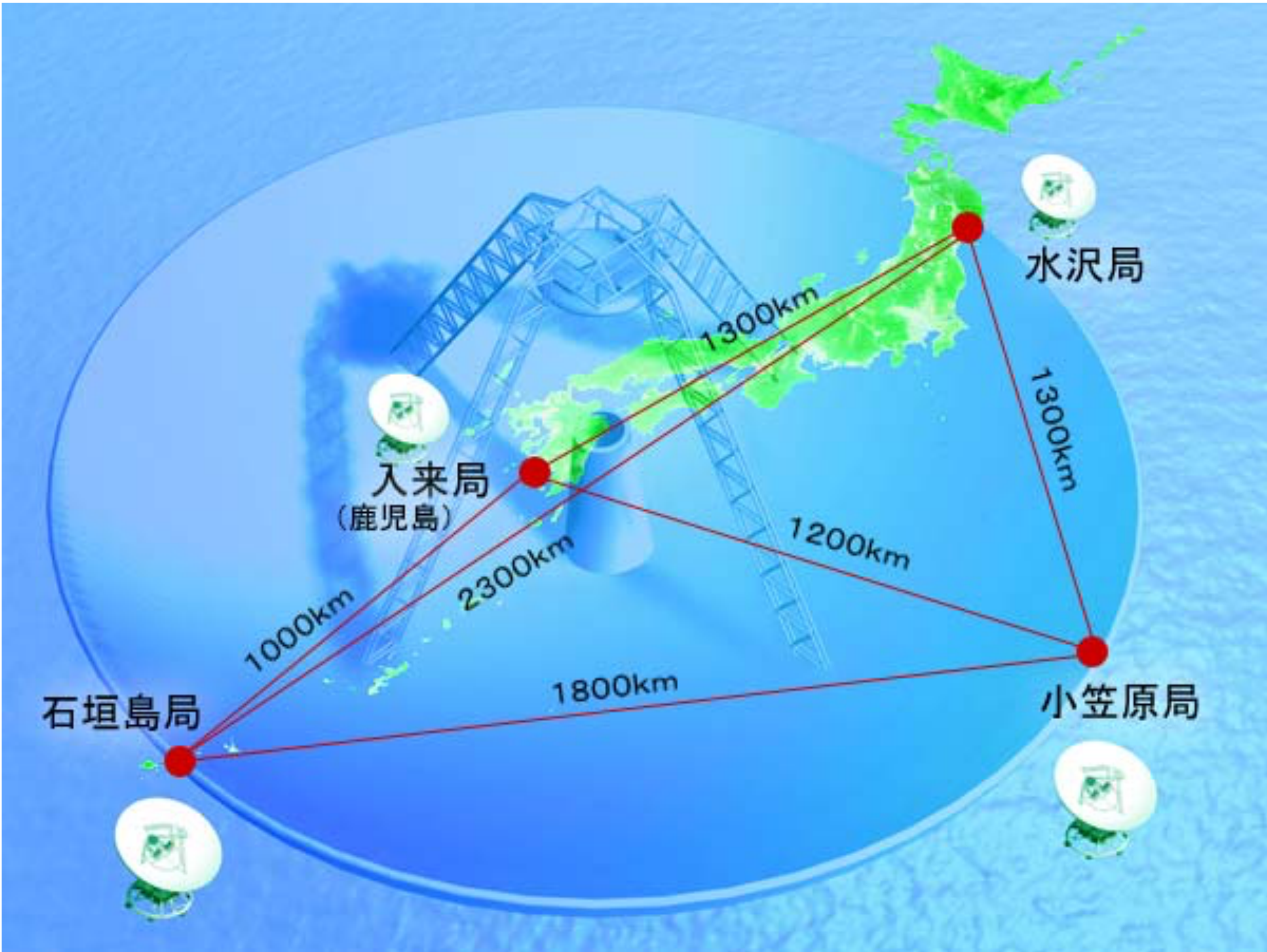


<http://alma.mtk.nao.ac.jp/>

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





First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration

(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of $42 \pm 3 \mu\text{as}$, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim 10:1$. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$. Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

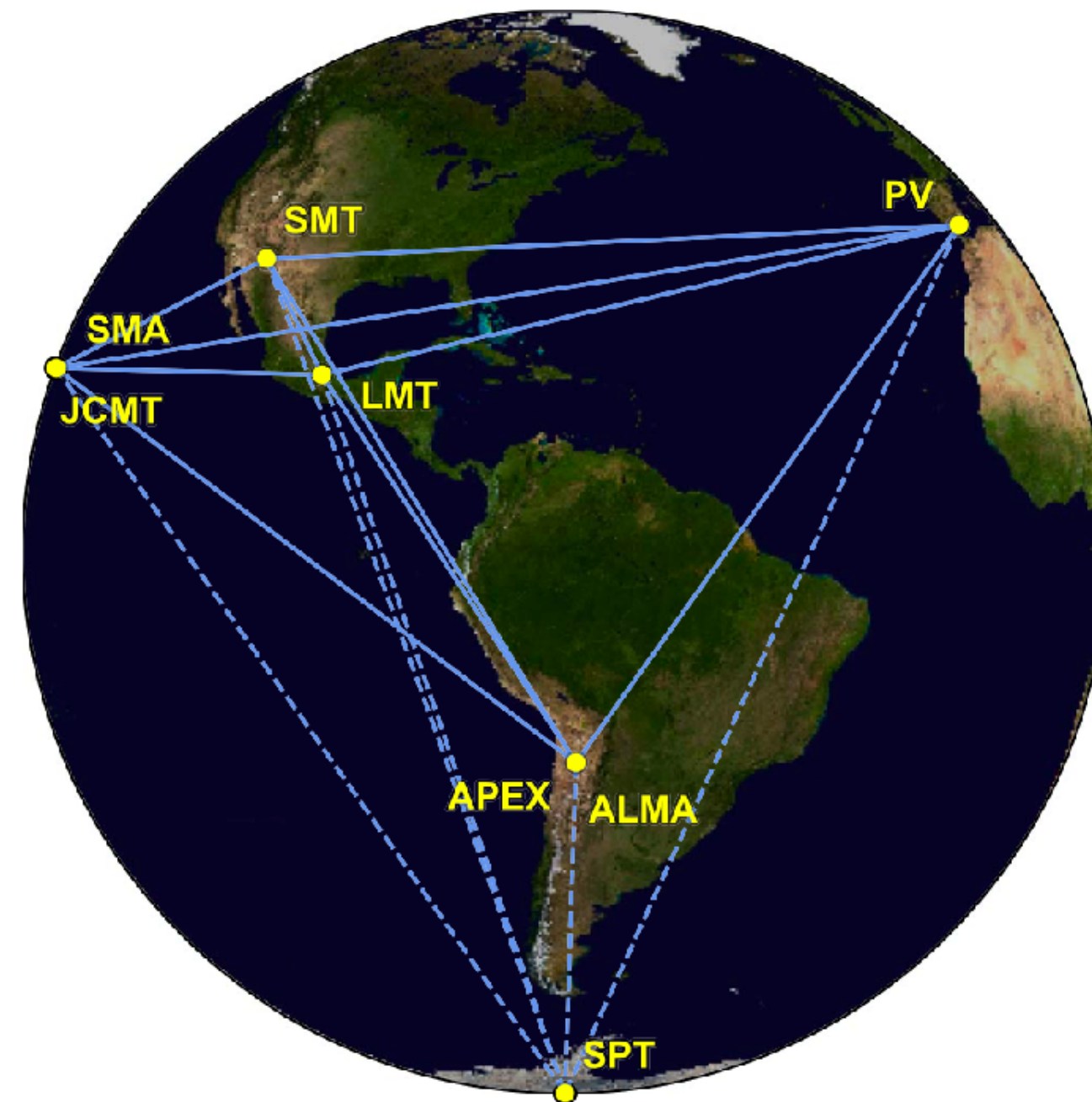


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

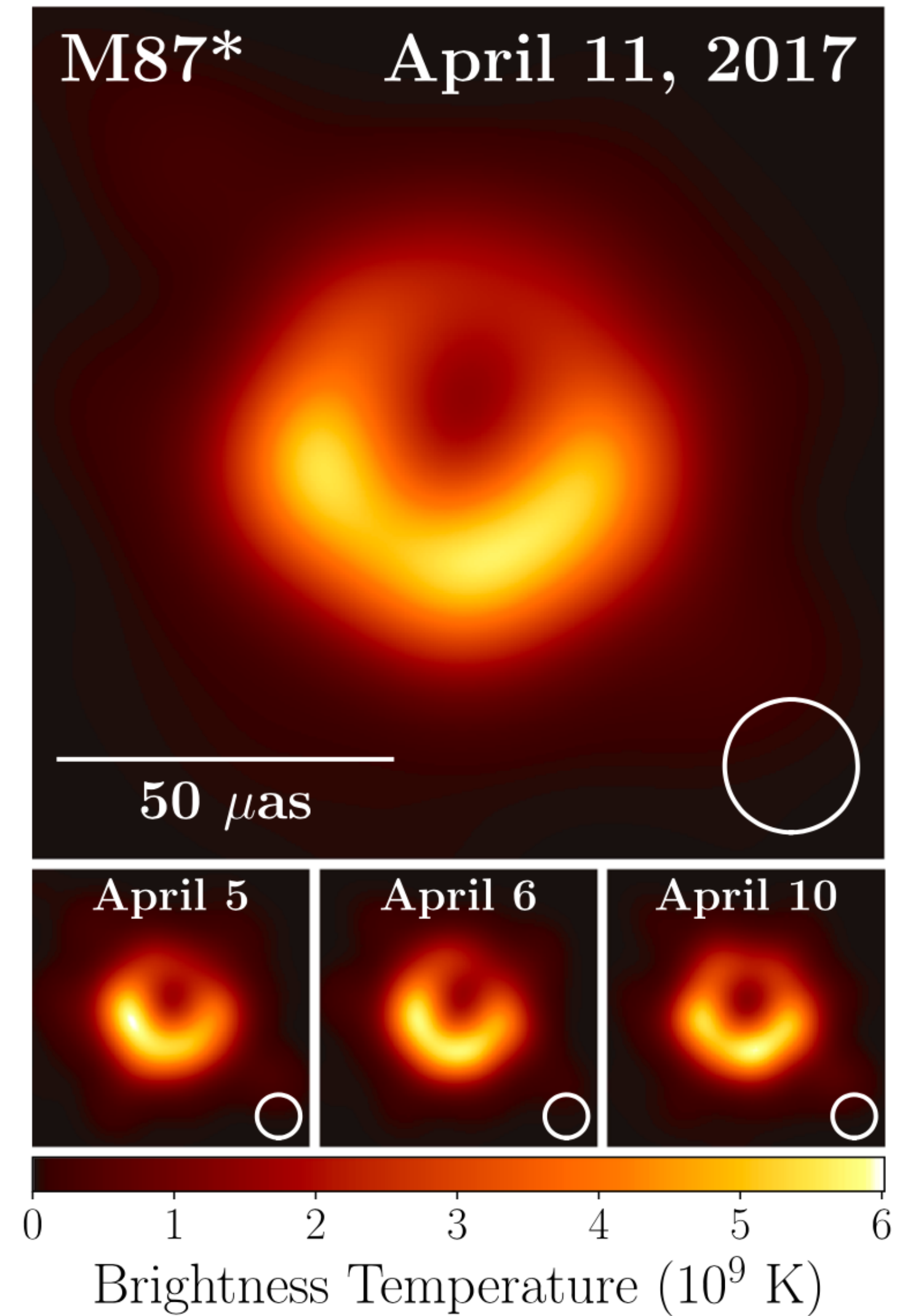


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the 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.

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像



<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eh/ideos.html>

0'58"

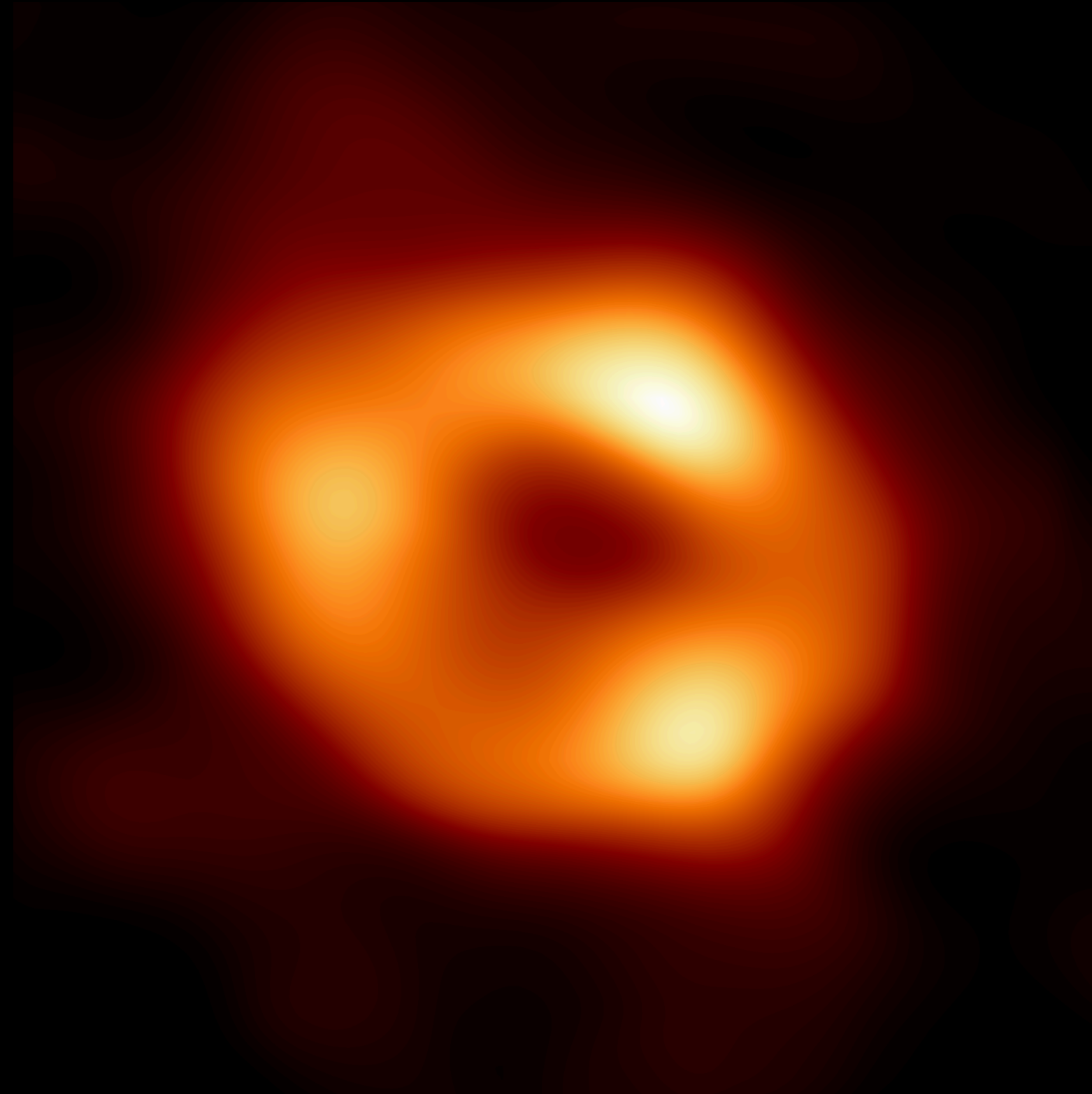
2019年4月10日 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



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」

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 930:L17 (44pp), 2022 May 10

© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6756>



First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. VI. Testing the Black Hole Metric

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2022 March 15; revised 2022 April 12; accepted 2022 April 12; published 2022 May 12

Abstract

Astrophysical black holes are expected to be described by the Kerr metric. This is the only stationary, vacuum, axisymmetric metric, without electromagnetic charge, that satisfies Einstein's equations and does not have pathologies outside of the event horizon. We present new constraints on potential deviations from the Kerr prediction based on 2017 EHT observations of Sagittarius A* (Sgr A*). We calibrate the relationship between the geometrically defined black hole shadow and the observed size of the ring-like images using a library that includes both Kerr and non-Kerr simulations. We use the exquisite prior constraints on the mass-to-distance ratio for Sgr A* to show that the observed image size is within ~10% of the Kerr predictions. We use these bounds to constrain metrics that are parametrically different from Kerr, as well as the charges of several known spacetimes. To consider alternatives to the presence of an event horizon, we explore the possibility that Sgr A* is a compact object with a surface that either absorbs and thermally reemits incident radiation or partially reflects it. Using the observed image size and the broadband spectrum of Sgr A*, we conclude that a thermal surface can be ruled out and a fully reflective one is unlikely. We compare our results to the broader landscape of gravitational tests. Together with the bounds found for stellar-mass black holes and the M87 black hole, our observations provide further support that the external spacetimes of all black holes are described by the Kerr metric, independent of their mass.

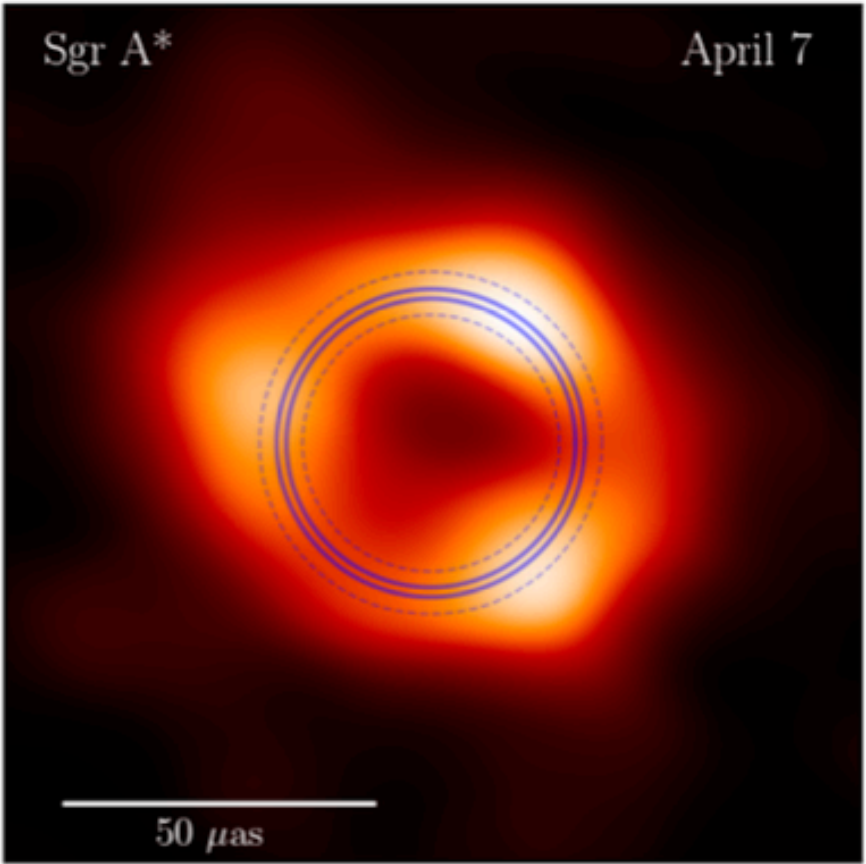
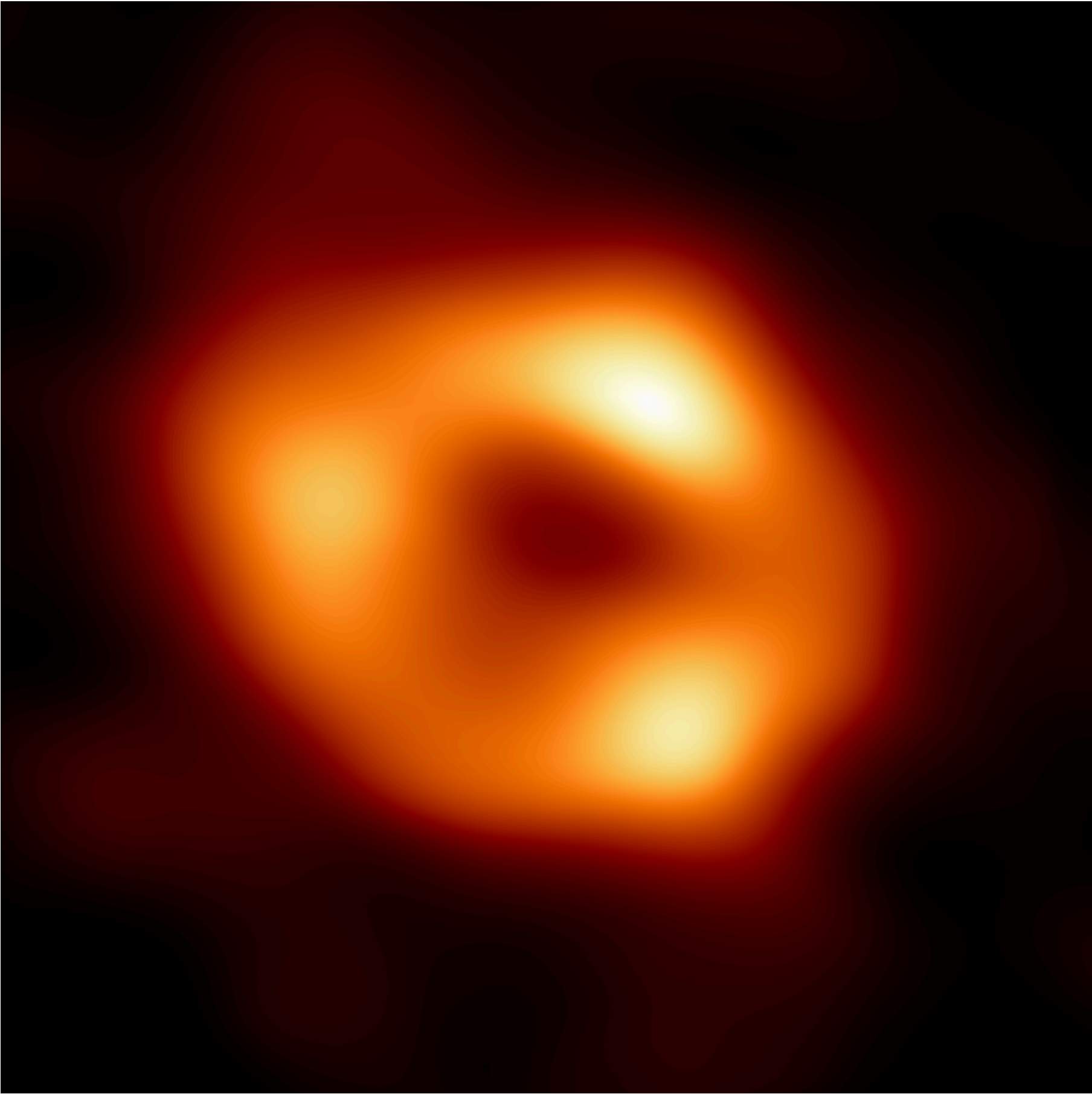


Figure 11. Inferred diameter of the black hole shadow boundary overlaid on the average EHT image of Sgr A* obtained from the 2017 April 7 data. Solid lines show the range of most likely values, while the dashed lines show the envelope of the 68th percentile credible intervals for all methods.

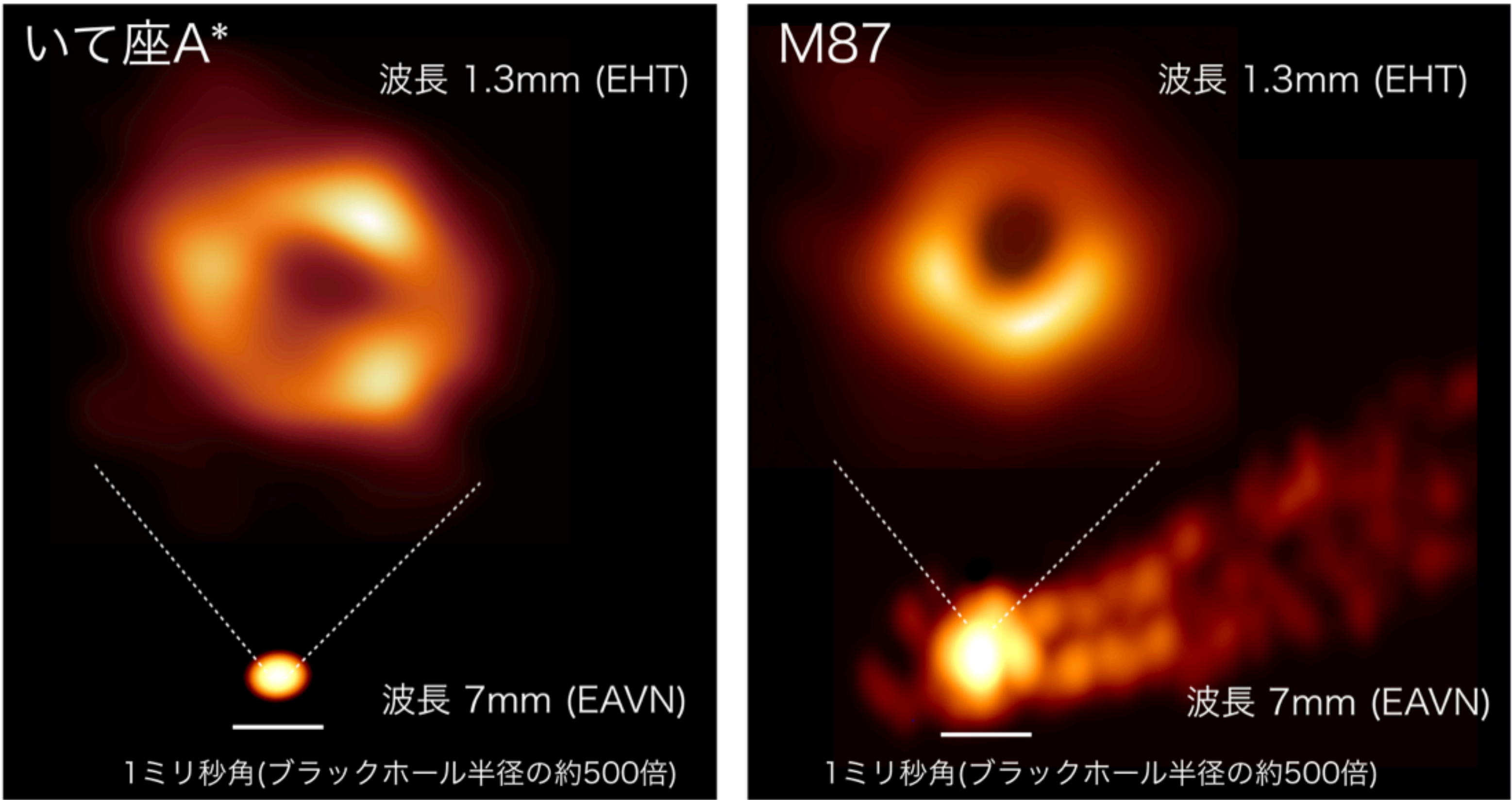


地球から2万8000光年

<https://eventhorizontelescope.org>

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20220512>



[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とてもよく似ている。（クレジット：EHT Collaboration, EAVN Collaboration）

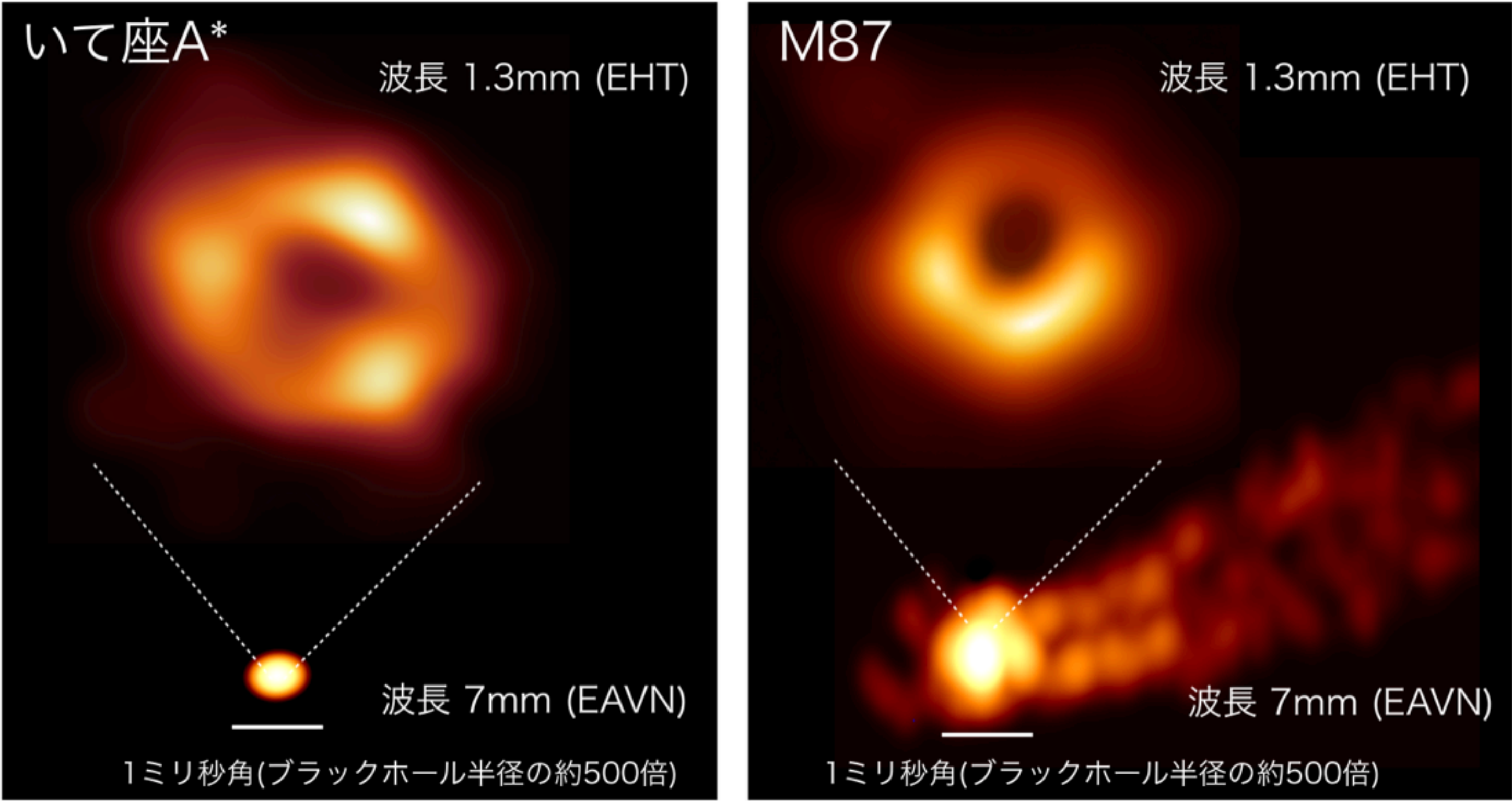
Sgr A*	M87
400万太陽質量	65億太陽質量
8 kpc	16.8 Mpc

3桁大きなBHが
3桁遠くにいてるので、
同じ位の大きさに見える

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

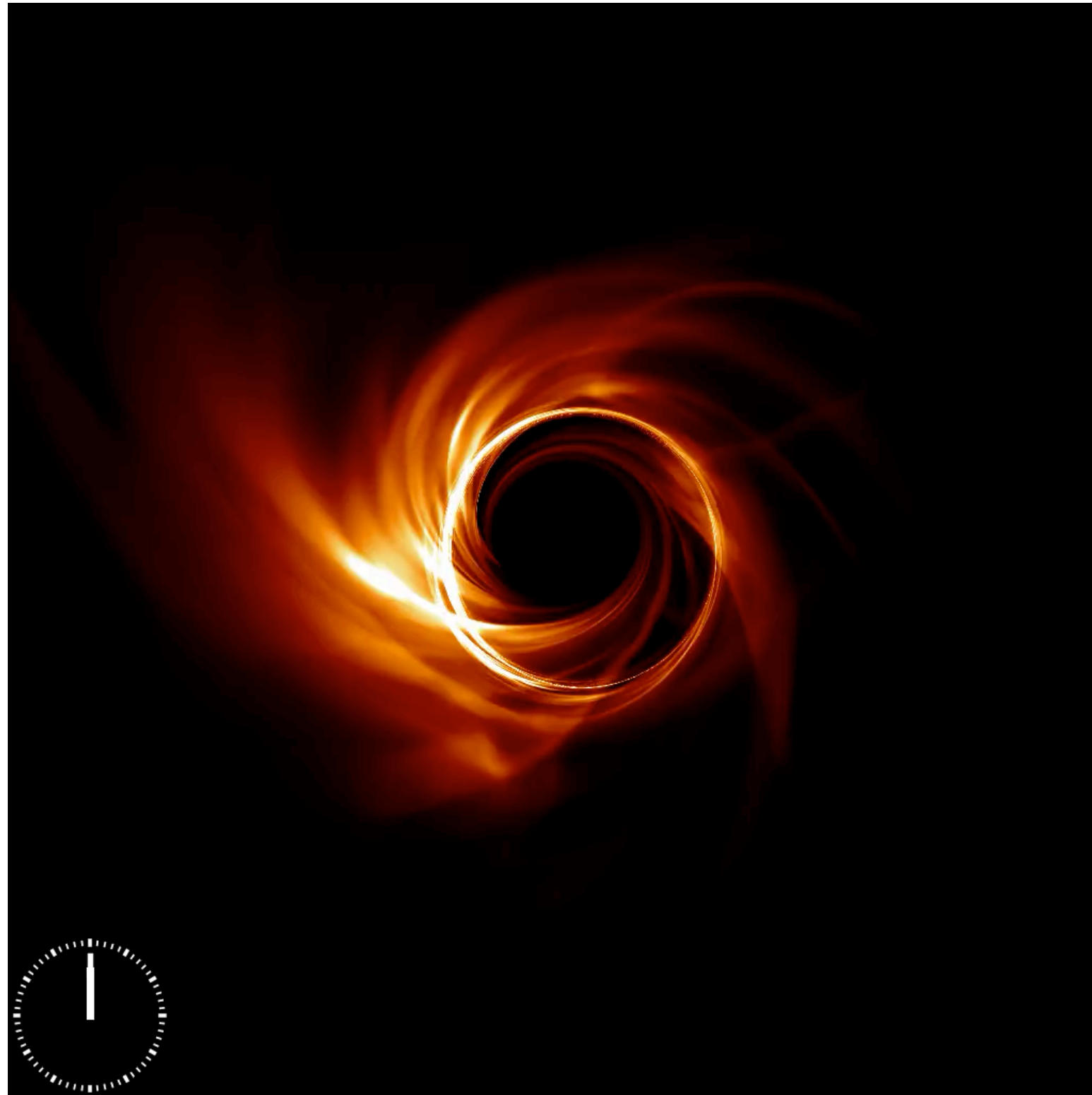
3桁大きなBHが
3桁遠くにいるので、
同じ位の大きさに見える



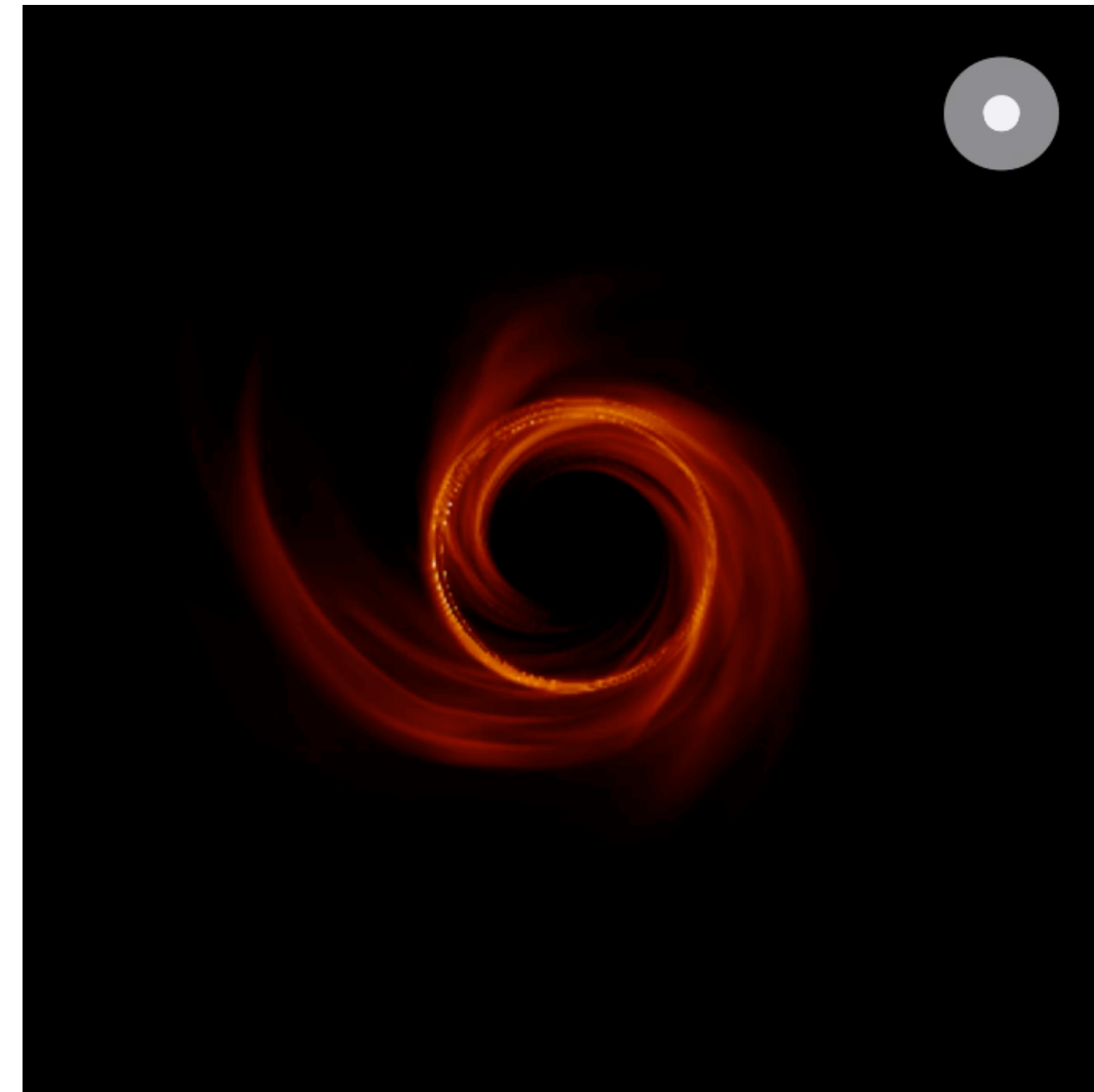
[図6] いて座A*（左）とM87（右）の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網（EAVN）で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。（クレジット：EHT Collaboration, EAVN Collaboration）

これからの観測ターゲットは動画

ブラックホールの回転軸の傾きも知りたい



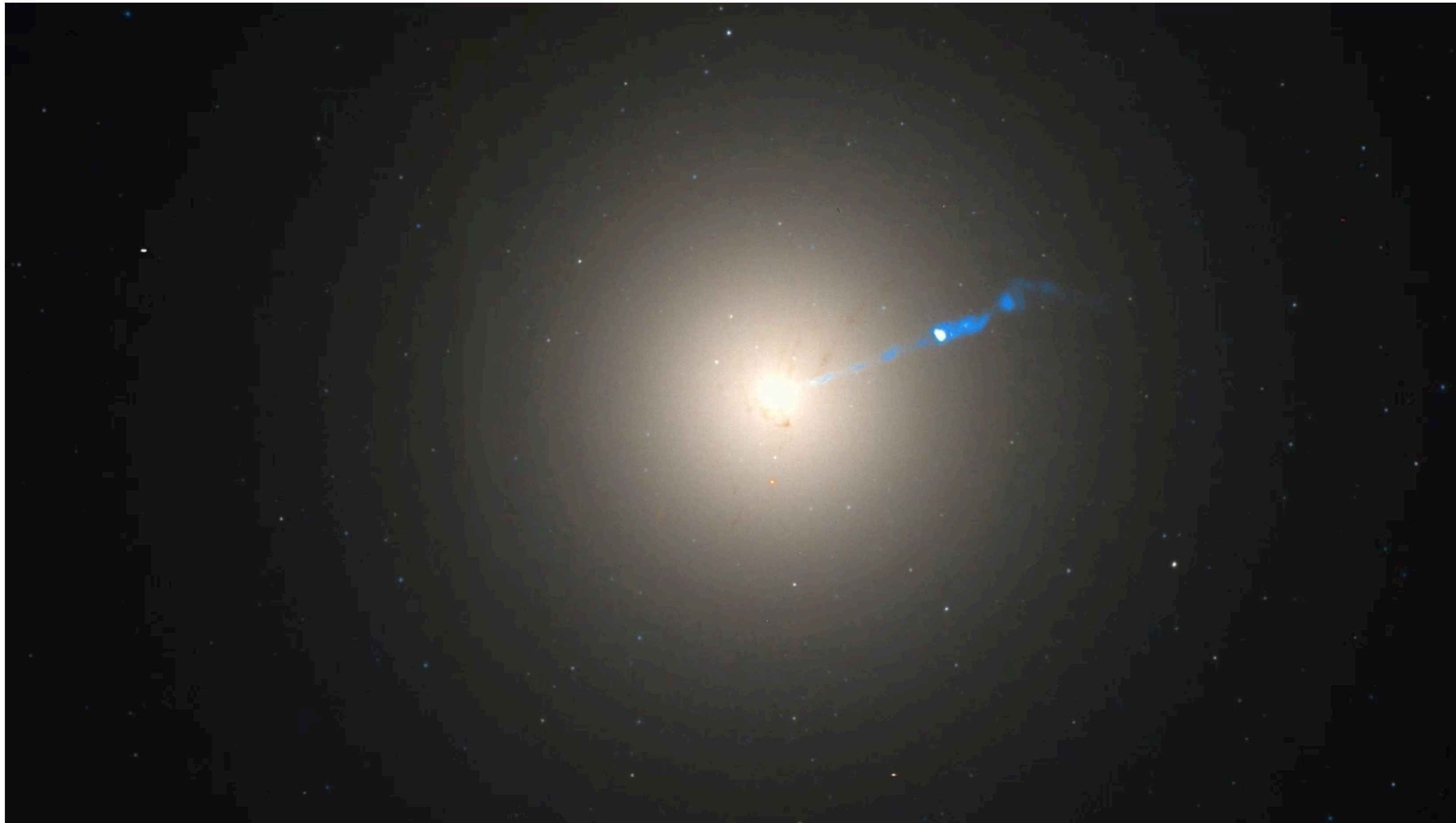
いて座A*の理論モデル画像(クレジット: Abhishek Joshi, University of Illinois at Urbana-Champaign)



見込み角の違いによるいて座A*の理論モデル画像の変化(クレジット: Vedant Dhruv, University of Illinois at Urbana-Champaign)

<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20220512-eh/videos.html>

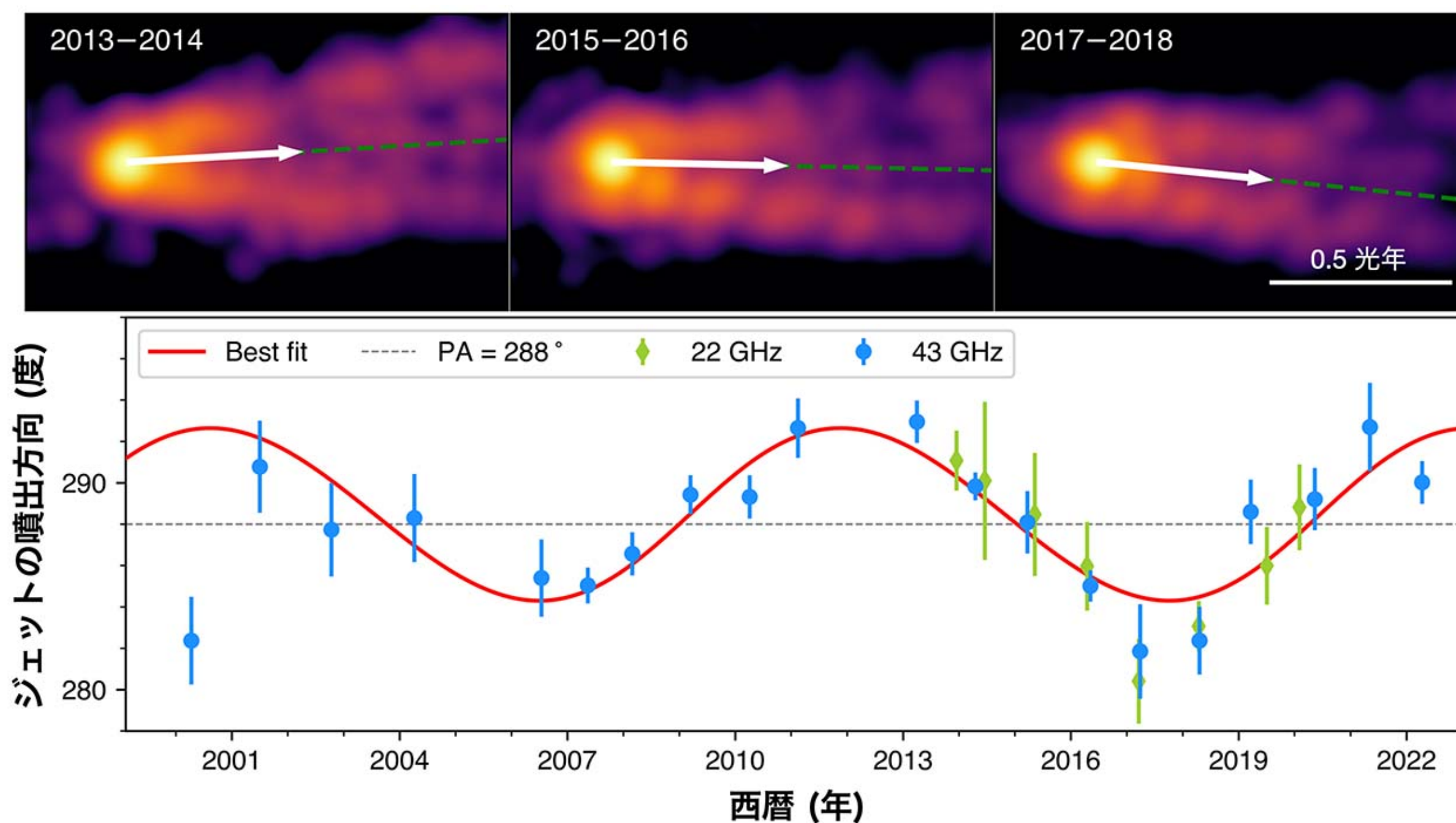
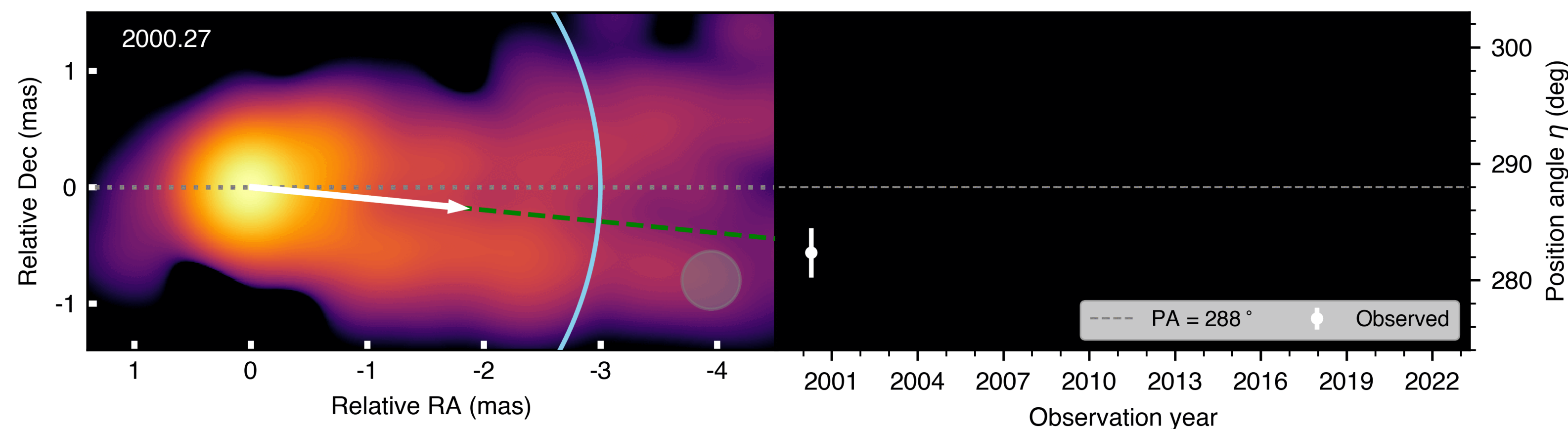
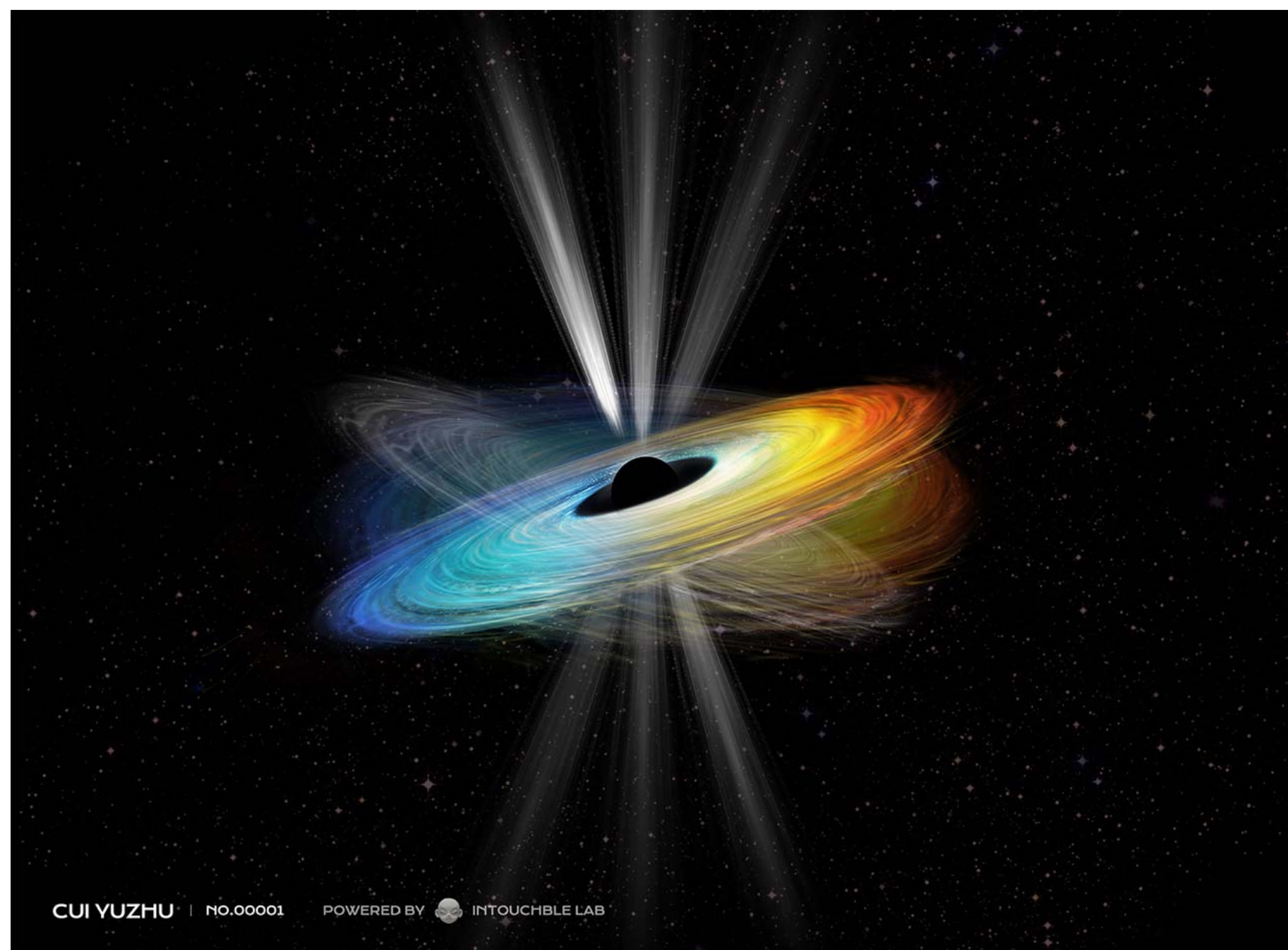
Event Horizon Telescopeのグループは、M87銀河（5000万光年先 [16.8Mpc]）の中心にあるブラックホール（質量は太陽の65億倍）が、11年周期で歳差しながらジェットを吹き出していることを確認した。M87中心のブラックホールは、初めて撮像に成功したブラックホール天体である。ブラックホールが自転していることを示す初めての観測的な報告となった。



<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20230928>

<https://www.nao.ac.jp/news/science/2023/20230928-eavn.html>

Event Horizon Telescopeのグループは、M87銀河（5000万光年先 [16.8Mpc]）の中心にあるブラックホール（質量は太陽の65億倍）が、11年周期で歳差しながらジェットを吹き出していることを確認した。M87中心のブラックホールは、初めて撮像に成功したブラックホール天体である。ブラックホールが自転していることを示す初めての観測的な報告となった。



<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20230928>

<https://www.nao.ac.jp/news/science/2023/20230928-eavn.html>

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

2. 見えないはずでは？

★ まわりのガスや天体の動きから

ブラックホールの存在がわかる！

★ ブラックホールの近くでは光も曲がって進む

(重力レンズ)

★ 見えたんです (2019年4月)

まわりの光で黒い部分が見えた!!!

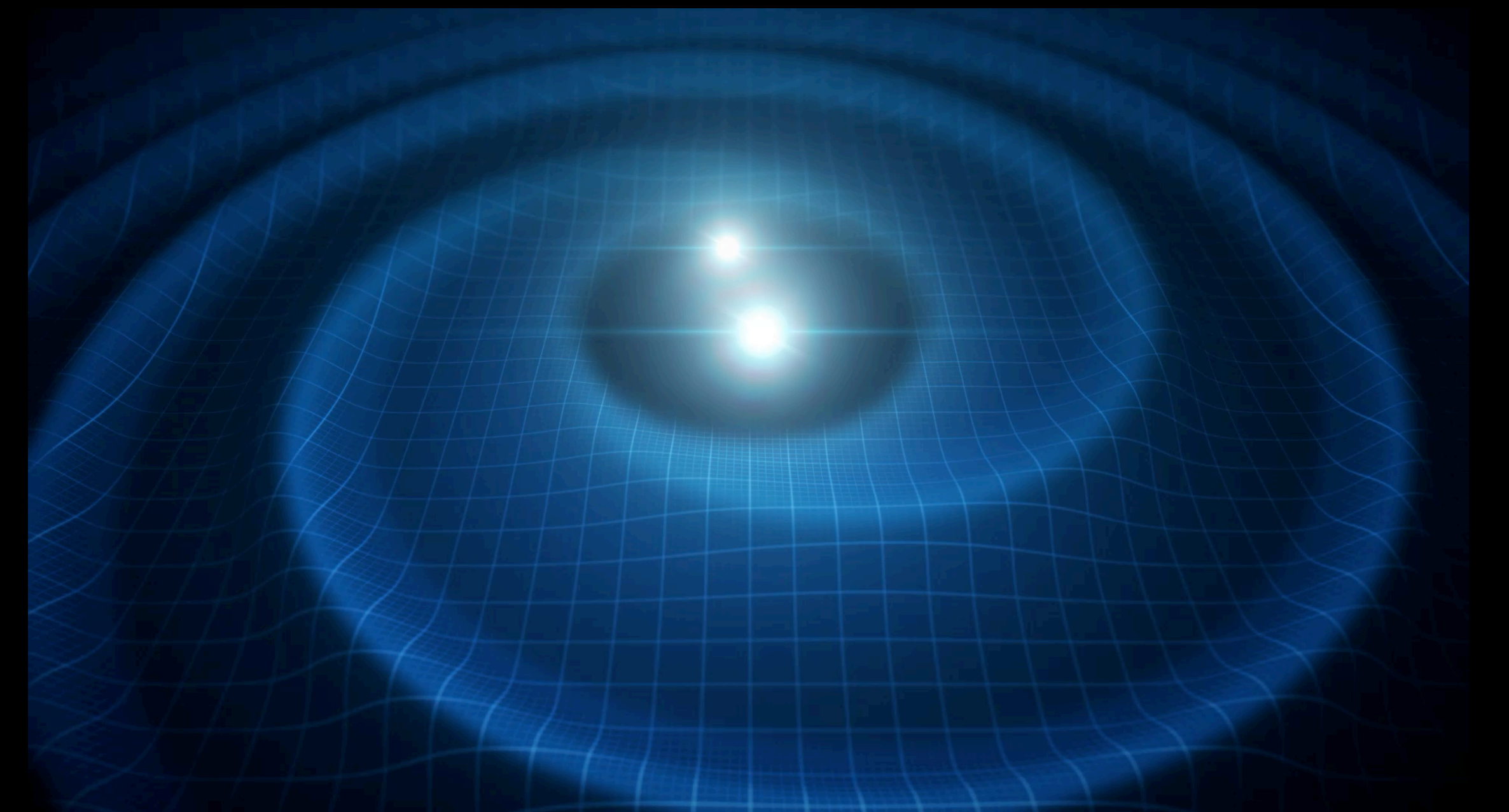
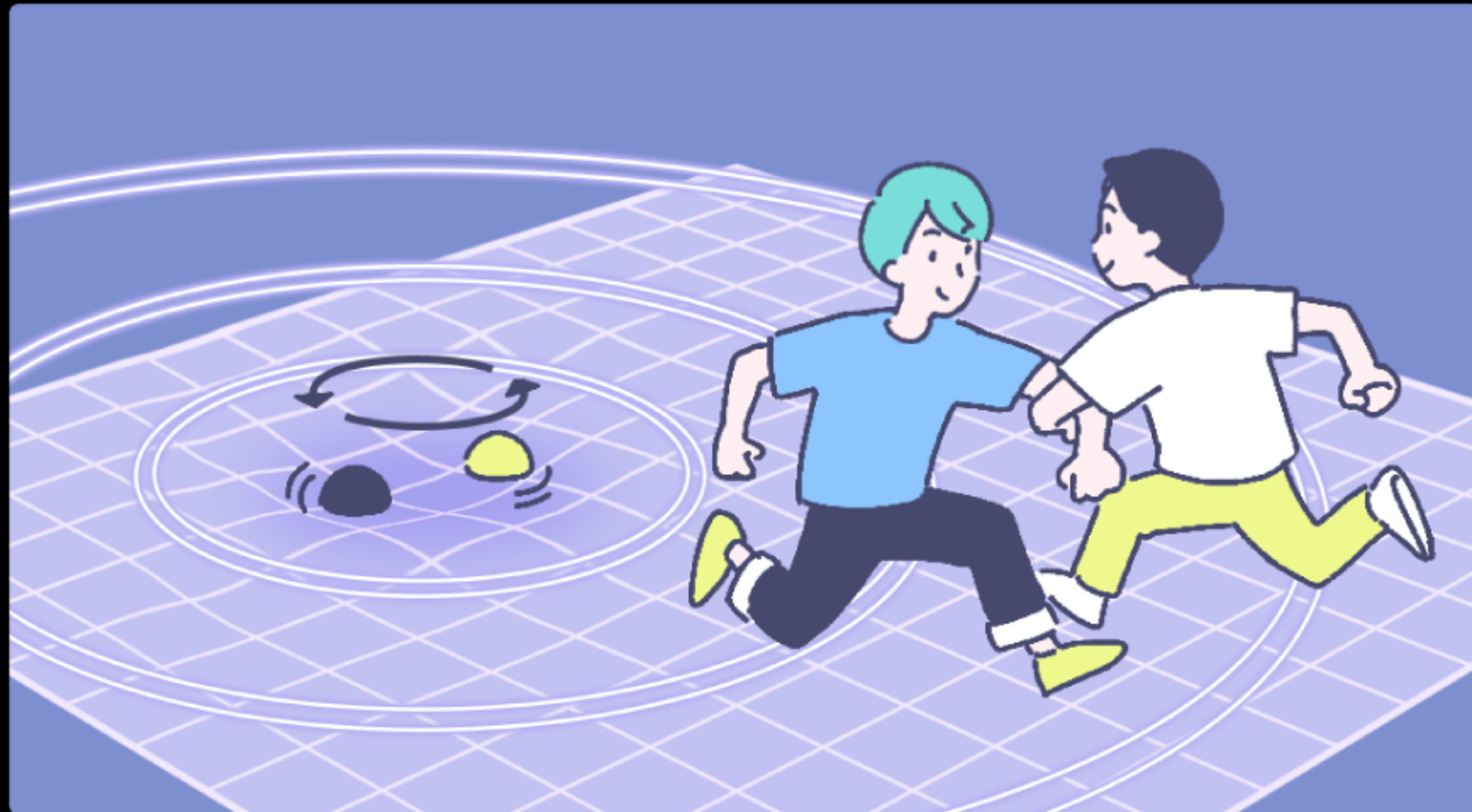
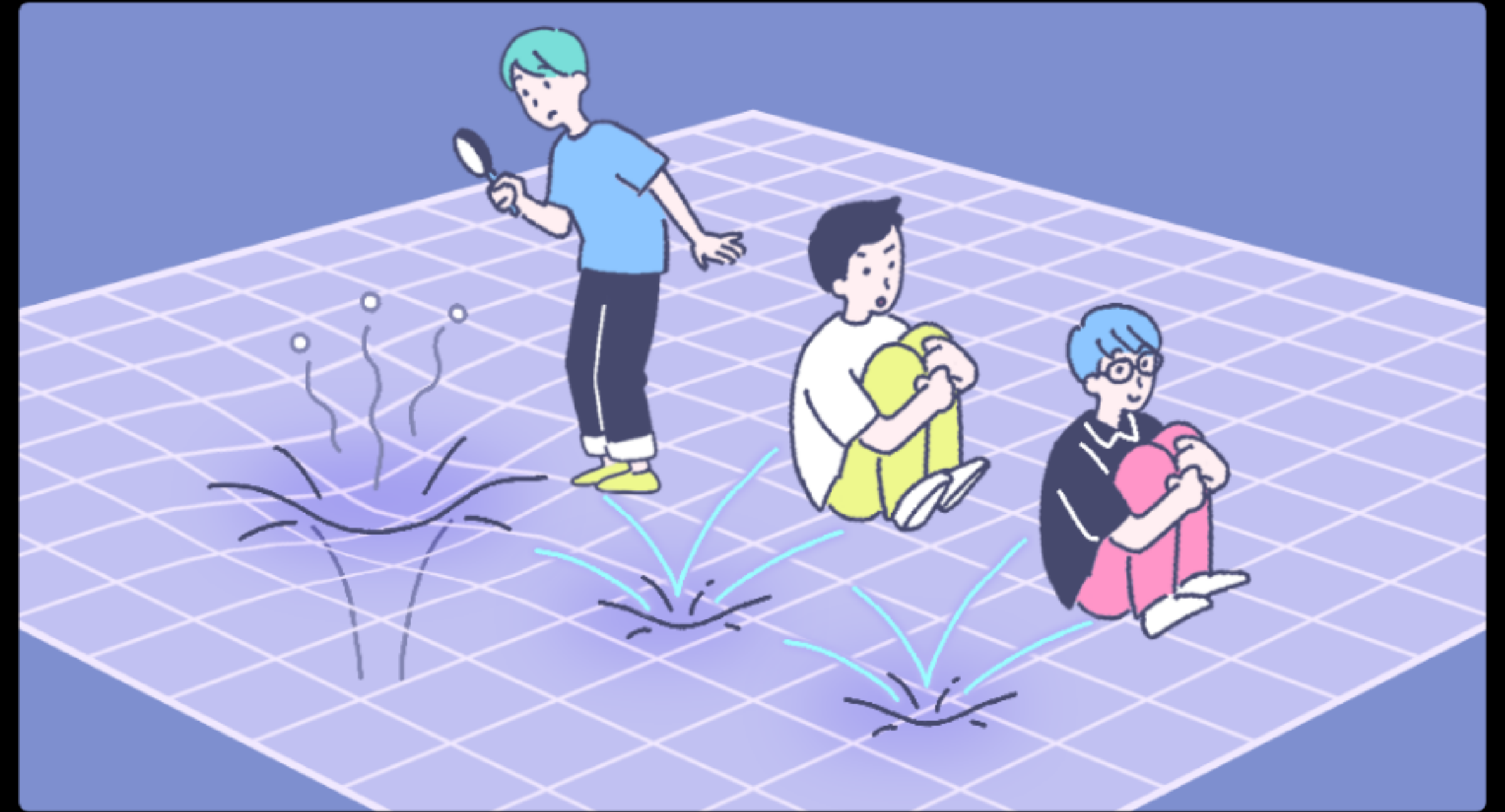
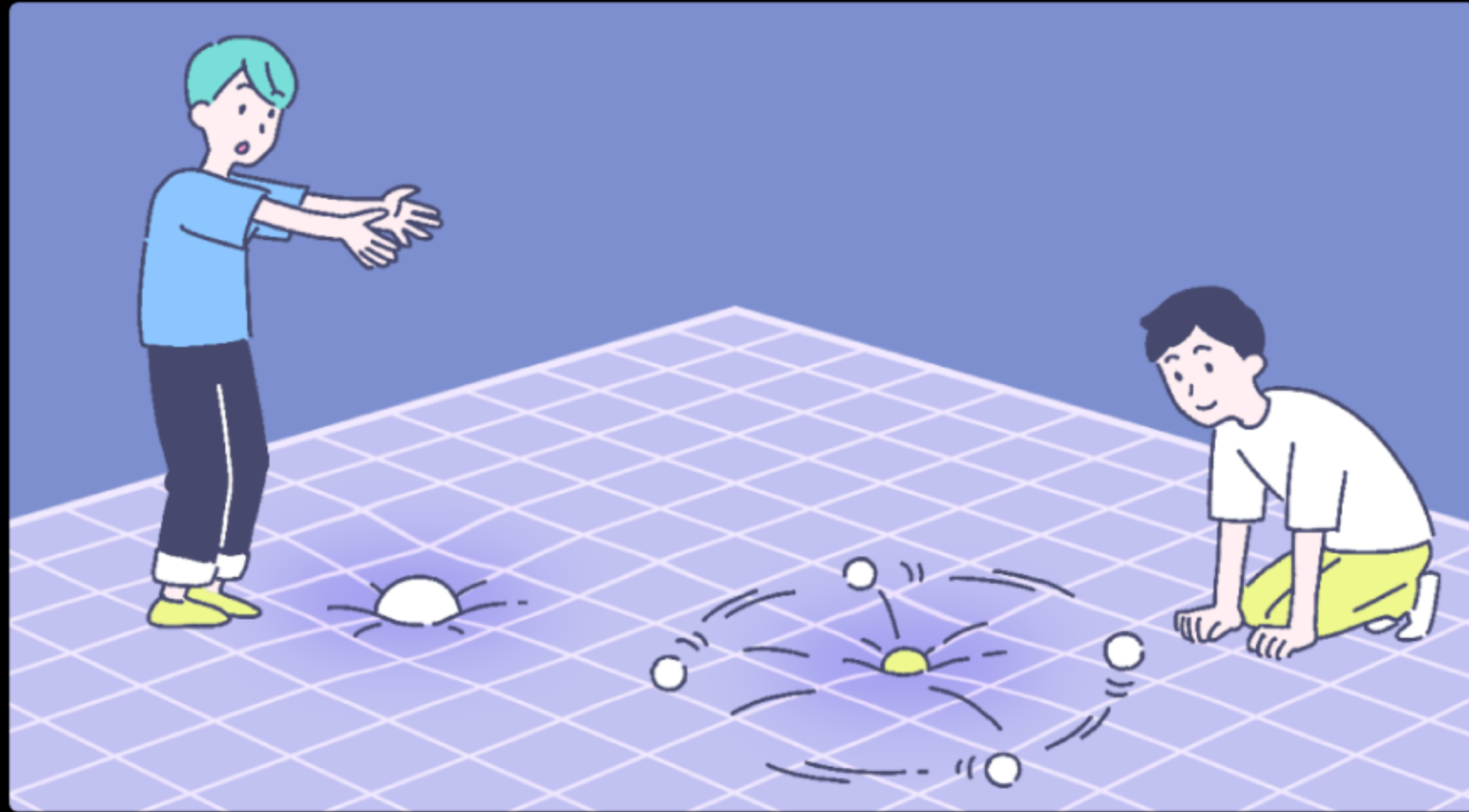
今日の話の内容

1. ブラックホールとは？
2. 見えないはずでは？
3. 音も聞こえないはずでは？

★ 重力波をつかまえた (2015年9月)

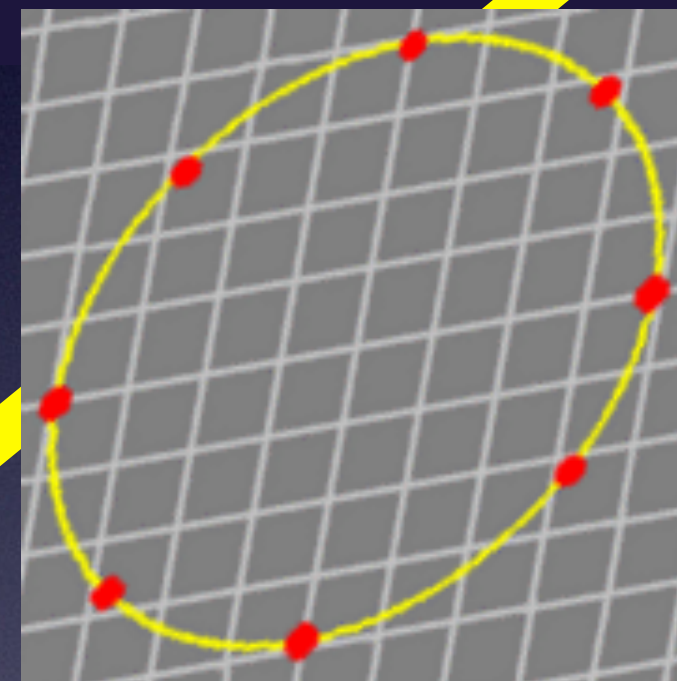
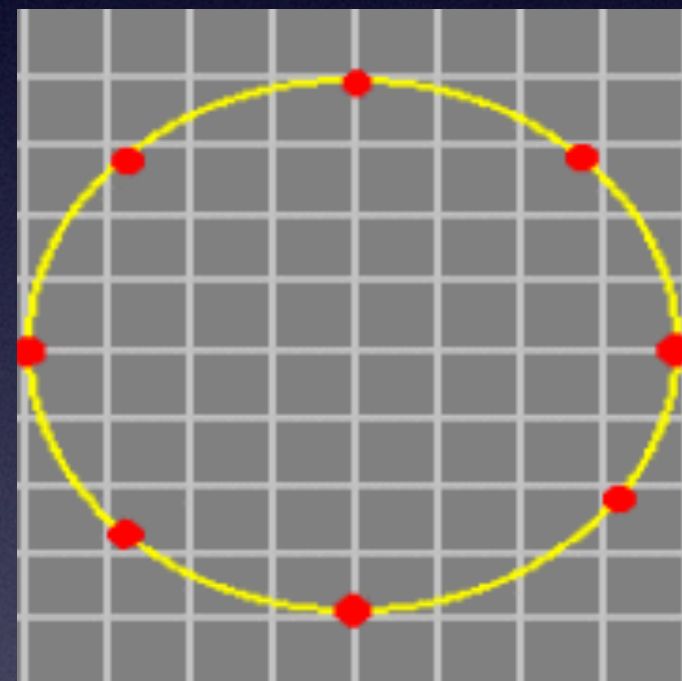
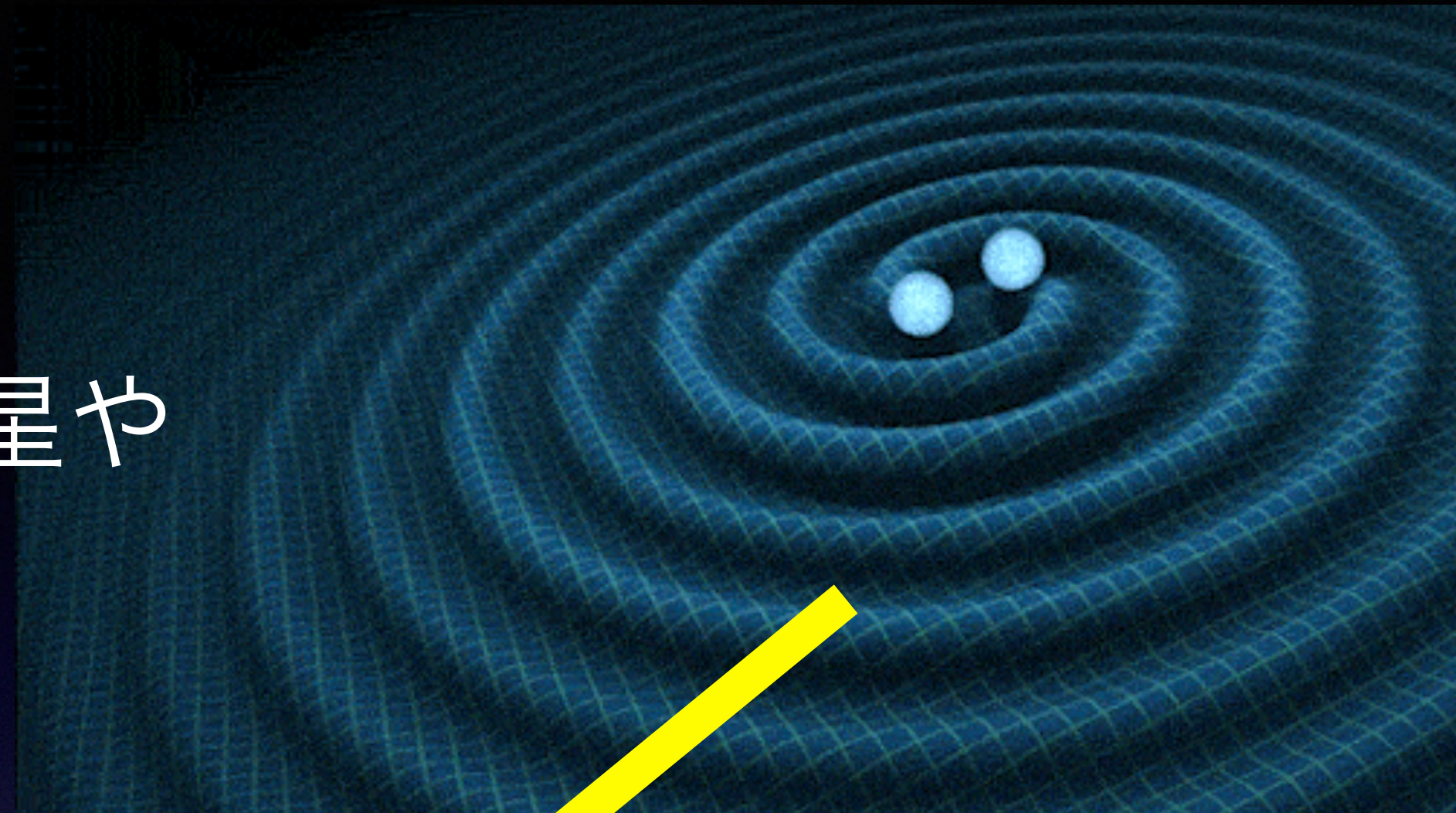
重力波

=時空のゆがみ（トランポリンのゆれ）が
波として伝わる



重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星

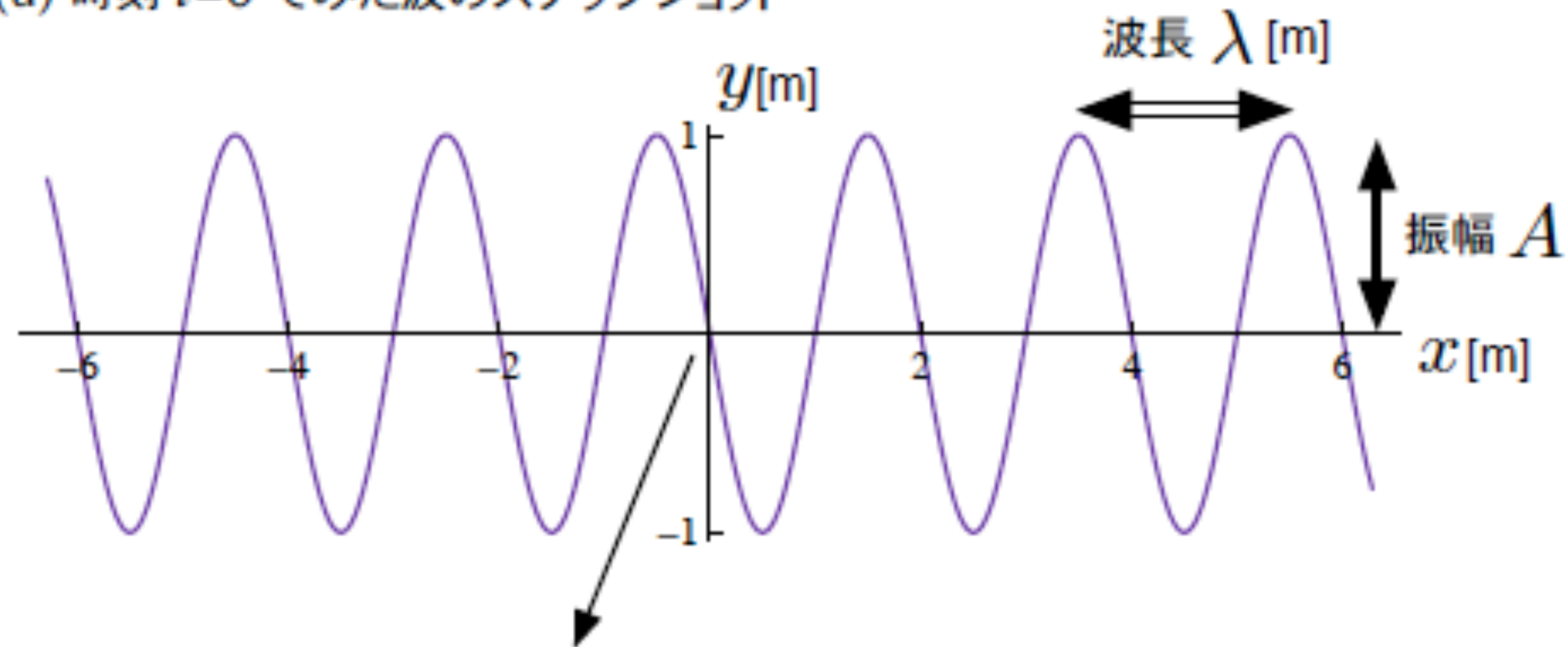


レーザー干渉計

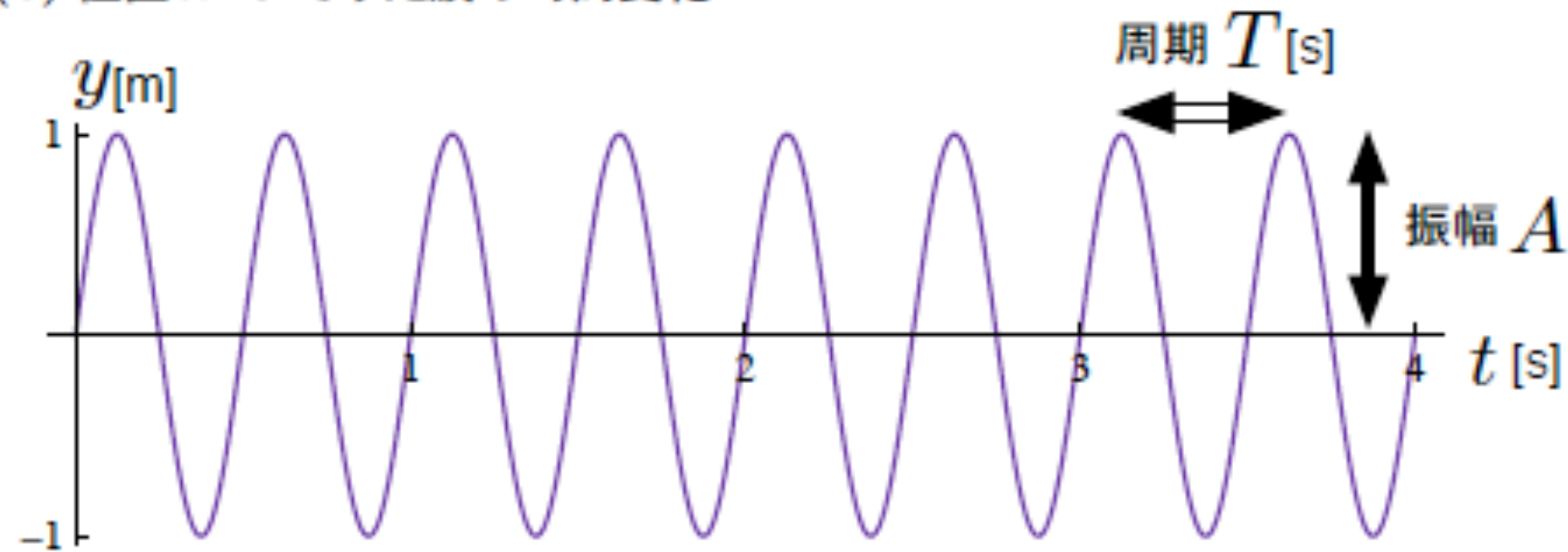
LIGO=Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

波を表す量： 振幅, 波長, 周期, 振動数, 速さ

(a) 時刻 $t=0$ でみた波のスナップショット

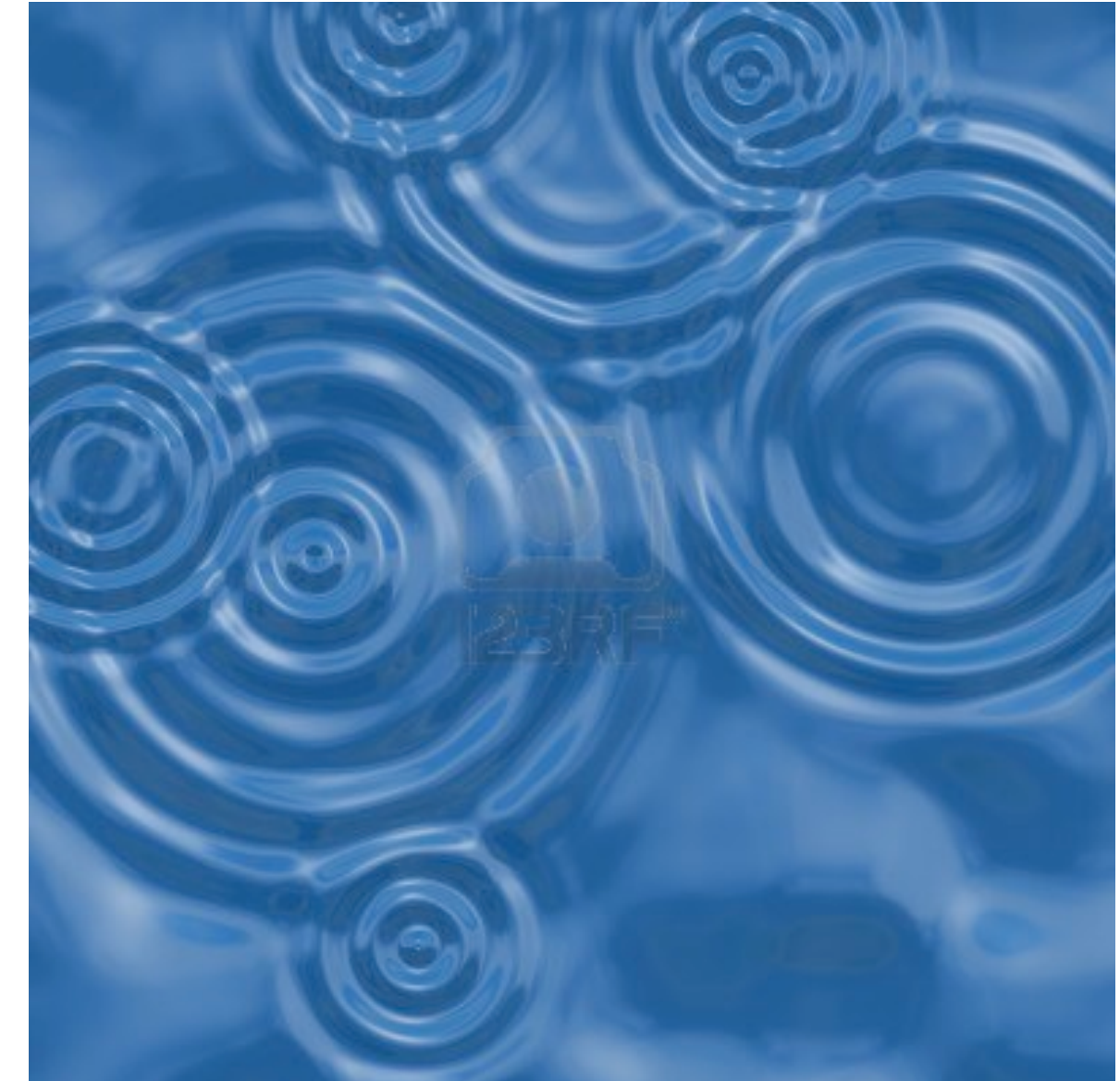
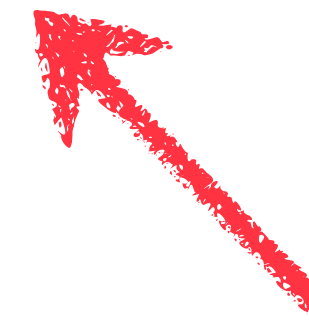


(b) 位置 $x=0$ でみた波の時間変化



「写真を撮る」

「全体図を知る」

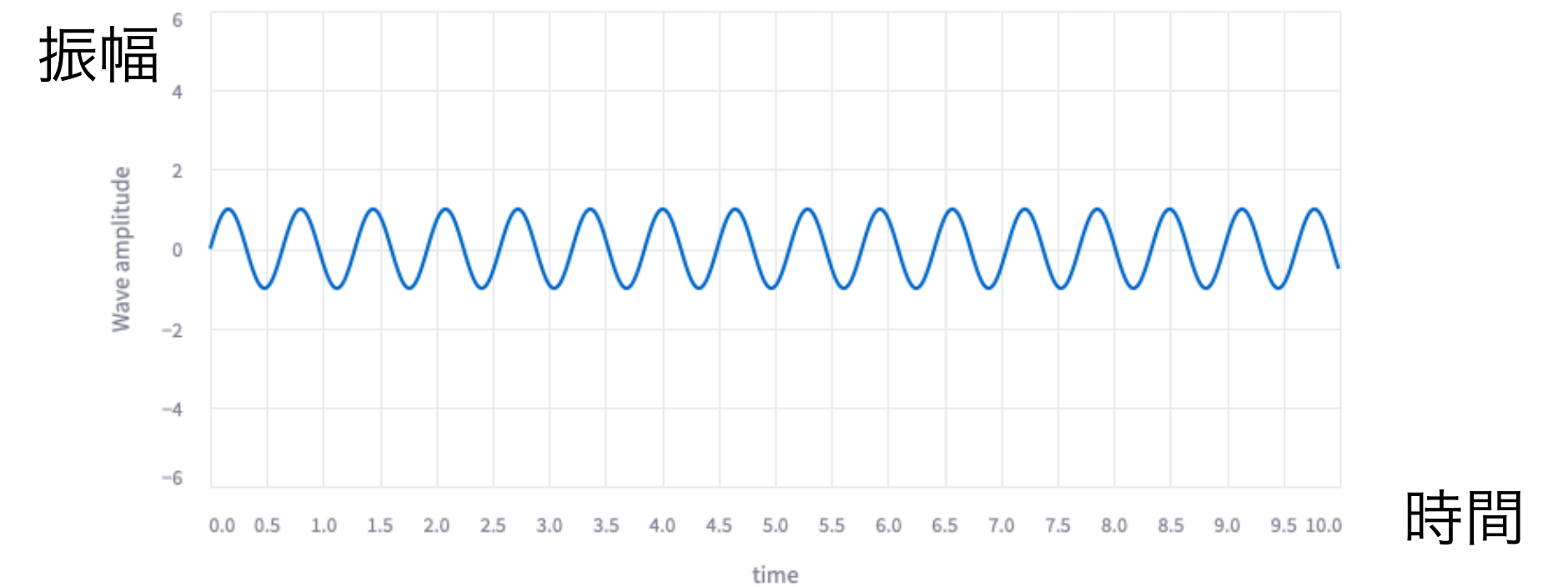


「1カ所での動きを見る」

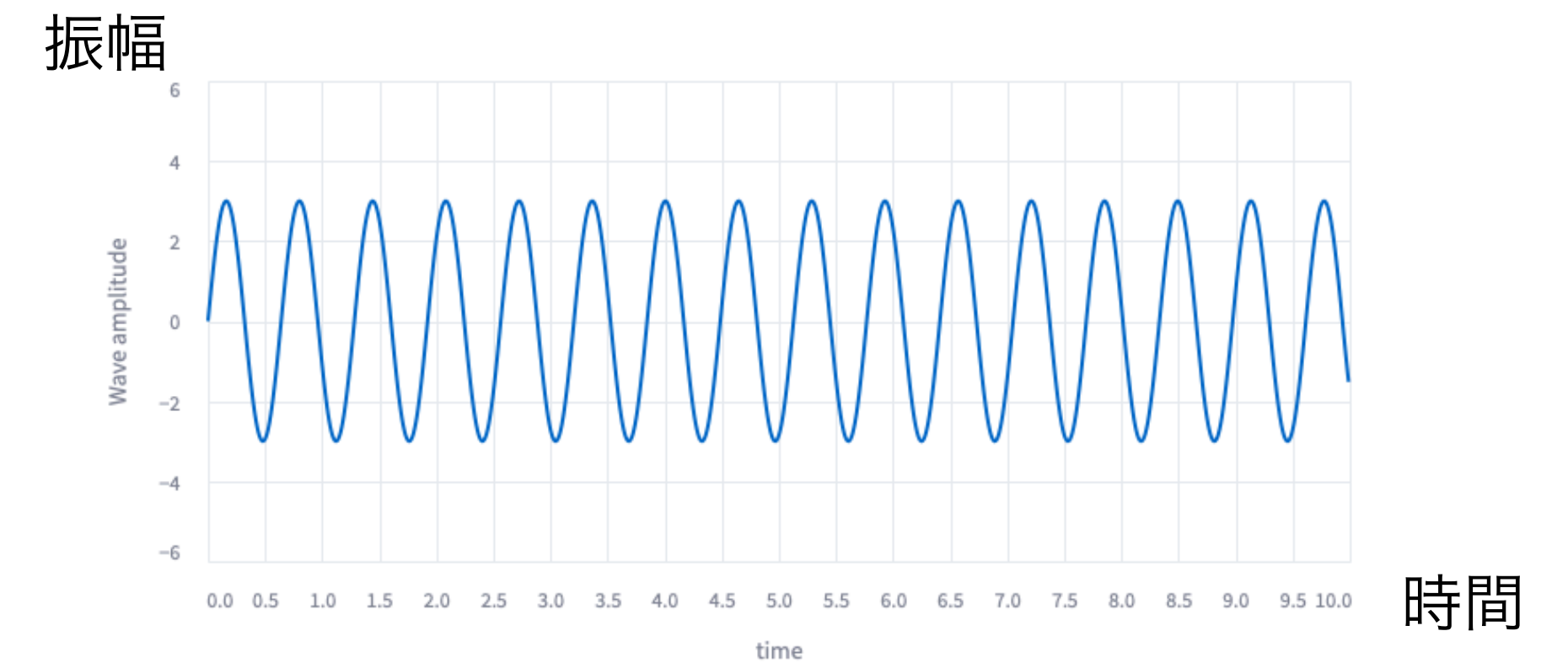
波の振幅

波の**振幅**を変えると
音の**大きさ**が変わるよ。

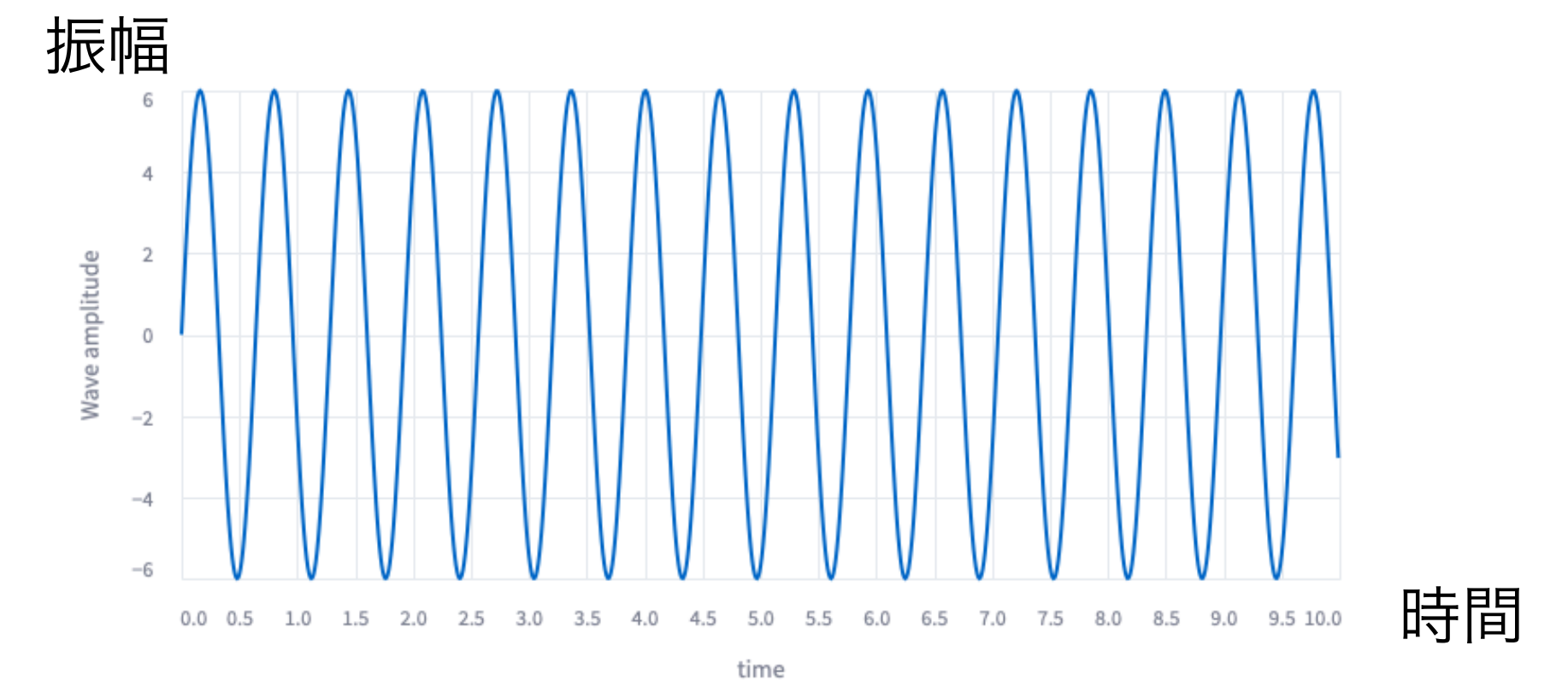
この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶



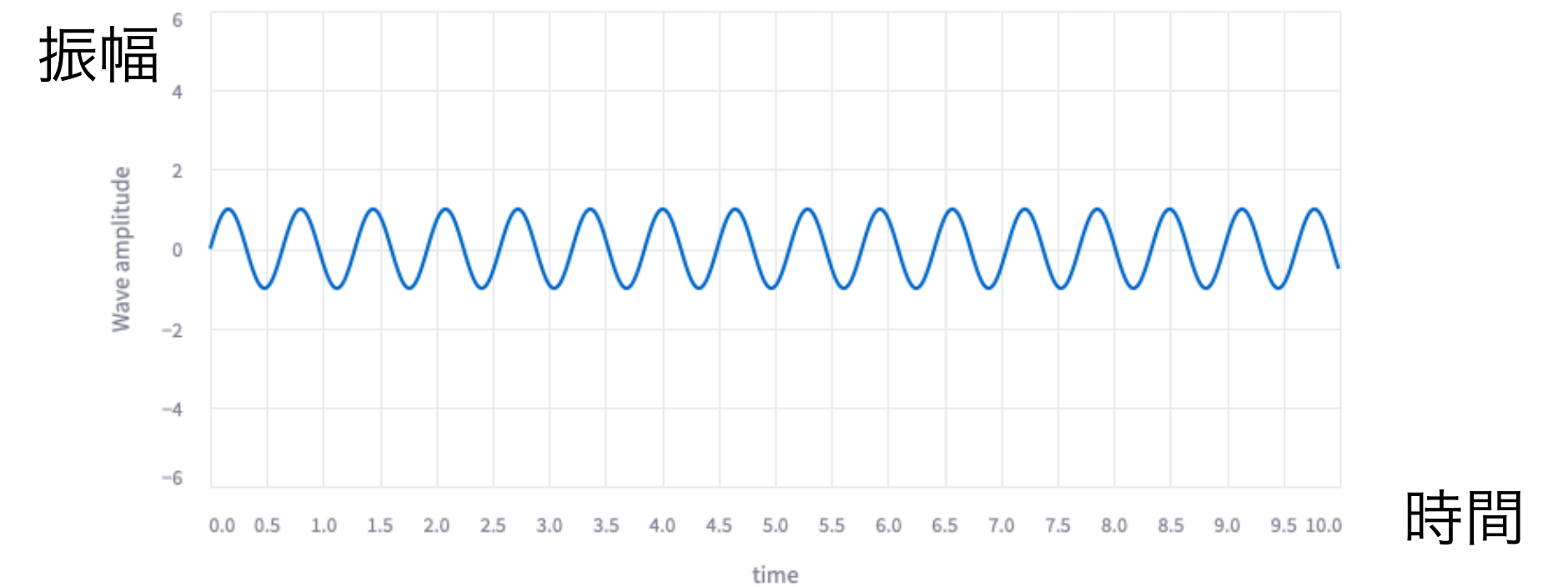
クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.

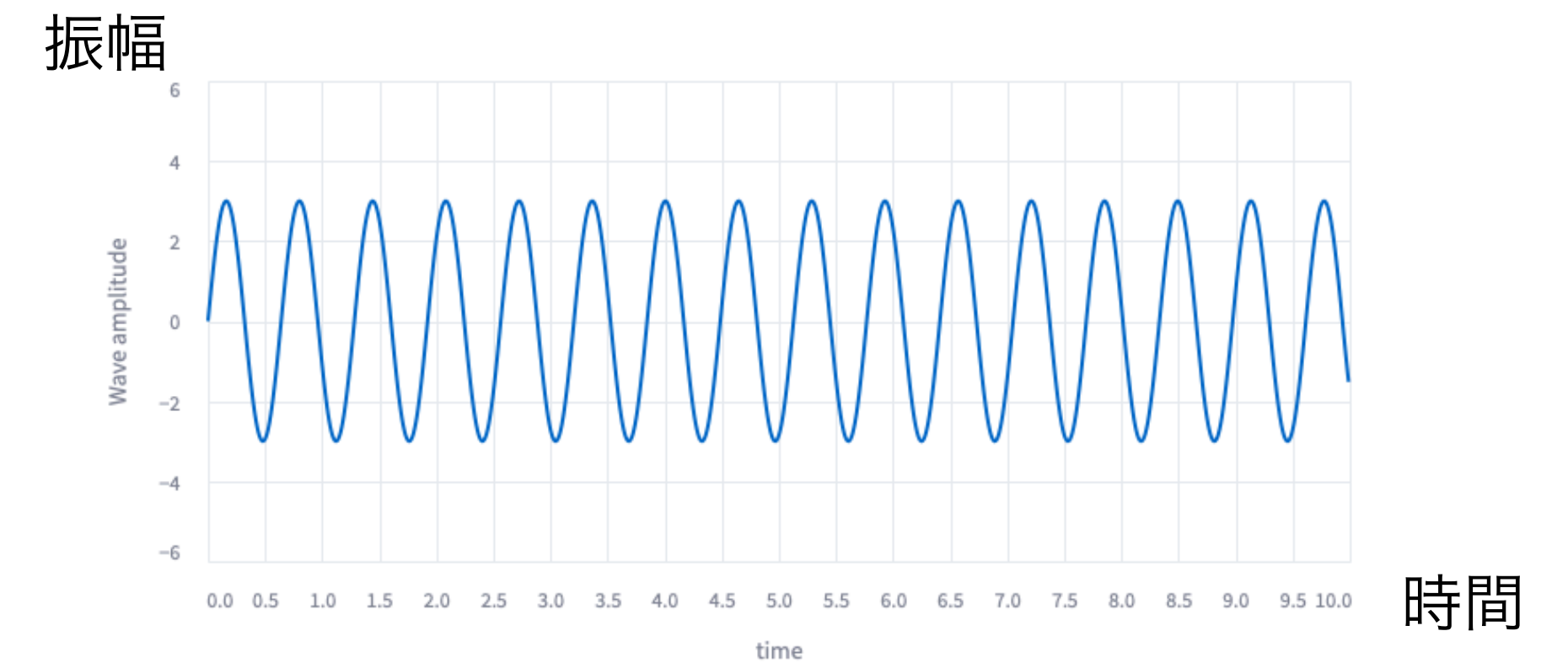
波の振幅

波の**振幅**を変えると
音の大きさが変わるよ.

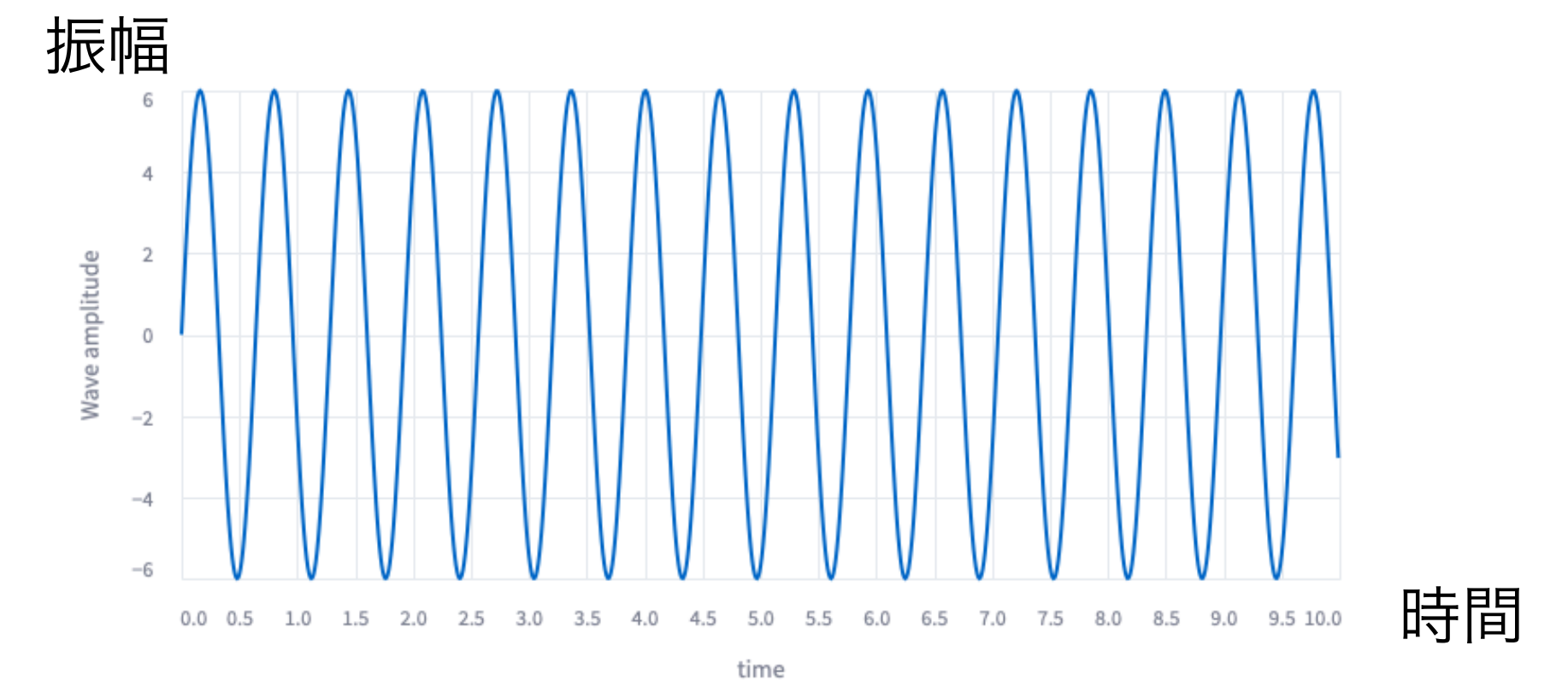
この波の音
再生中▶



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▶

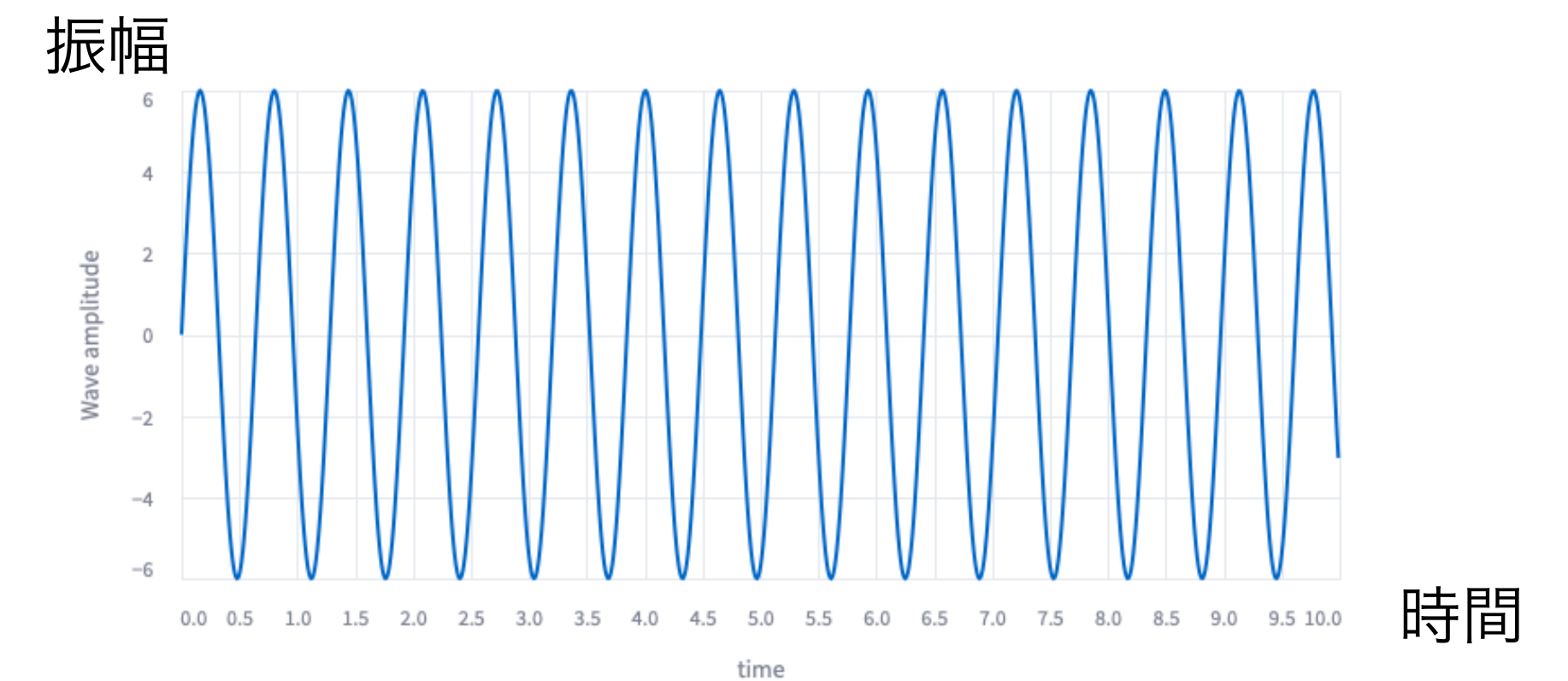
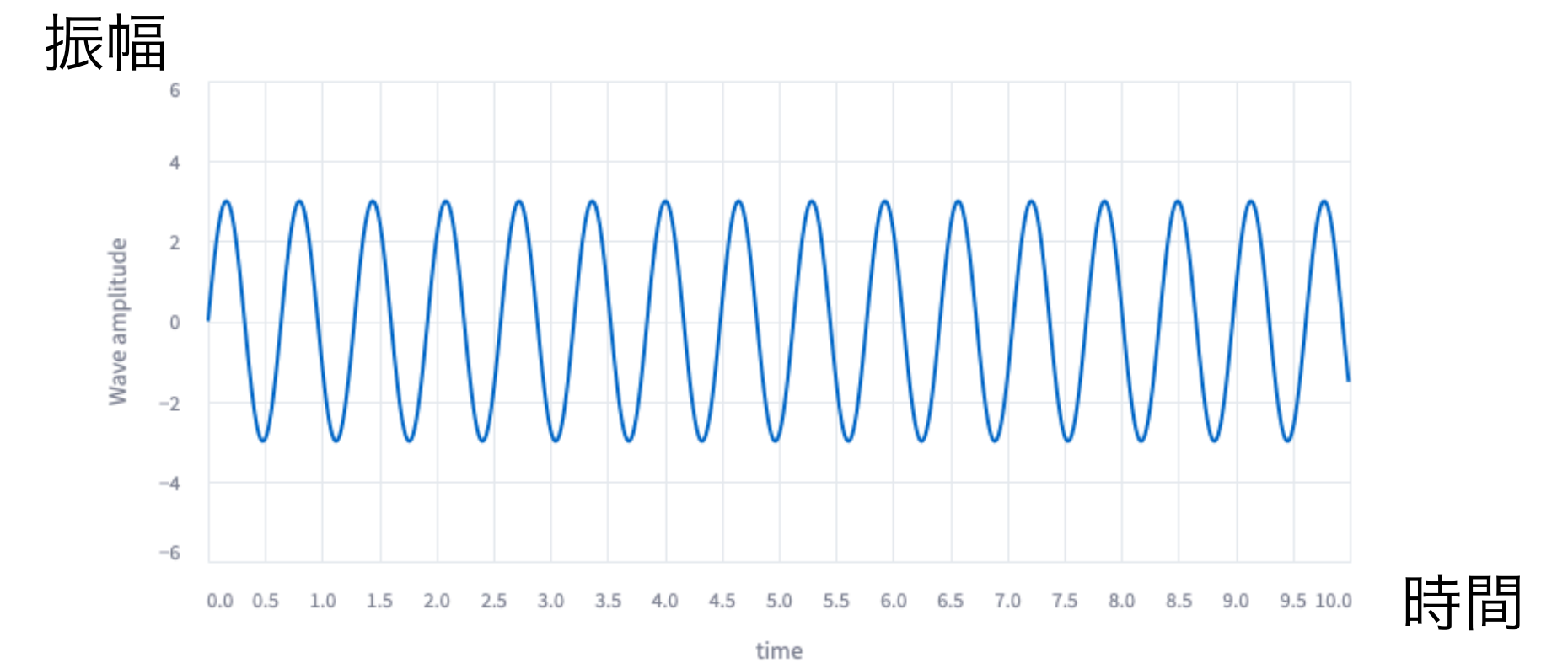
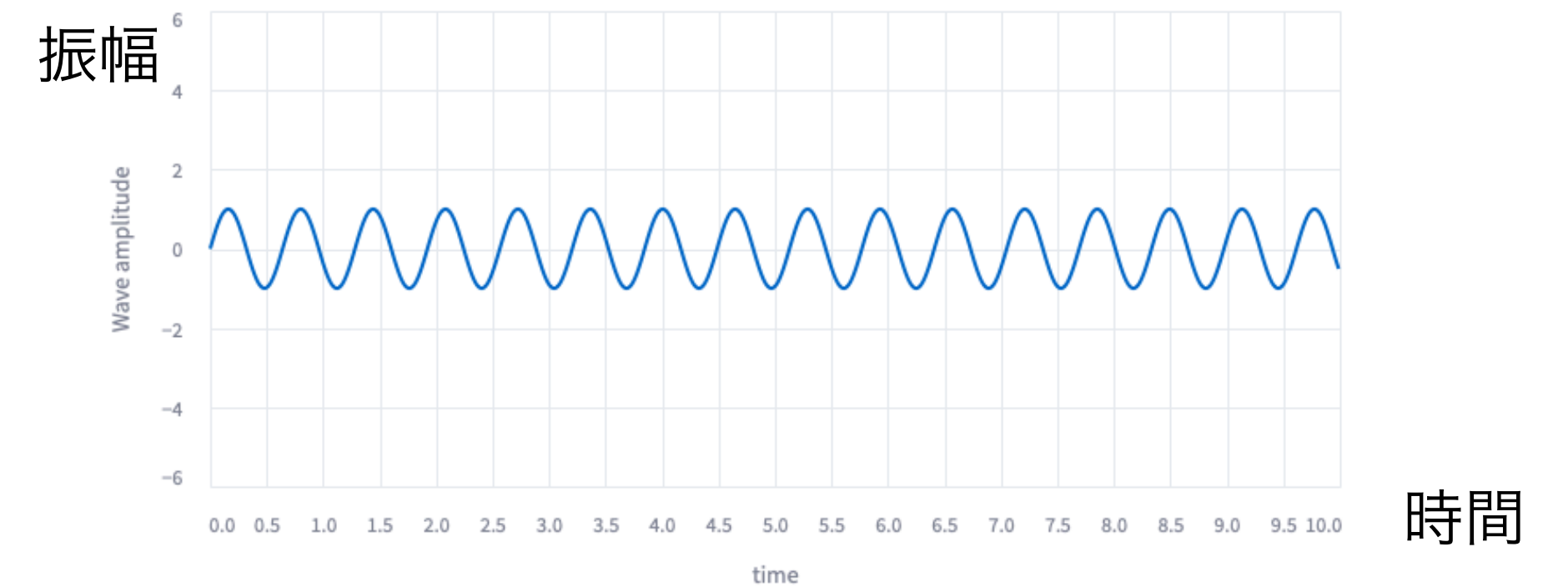


この波の音を
聴いてみよう▶



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▶

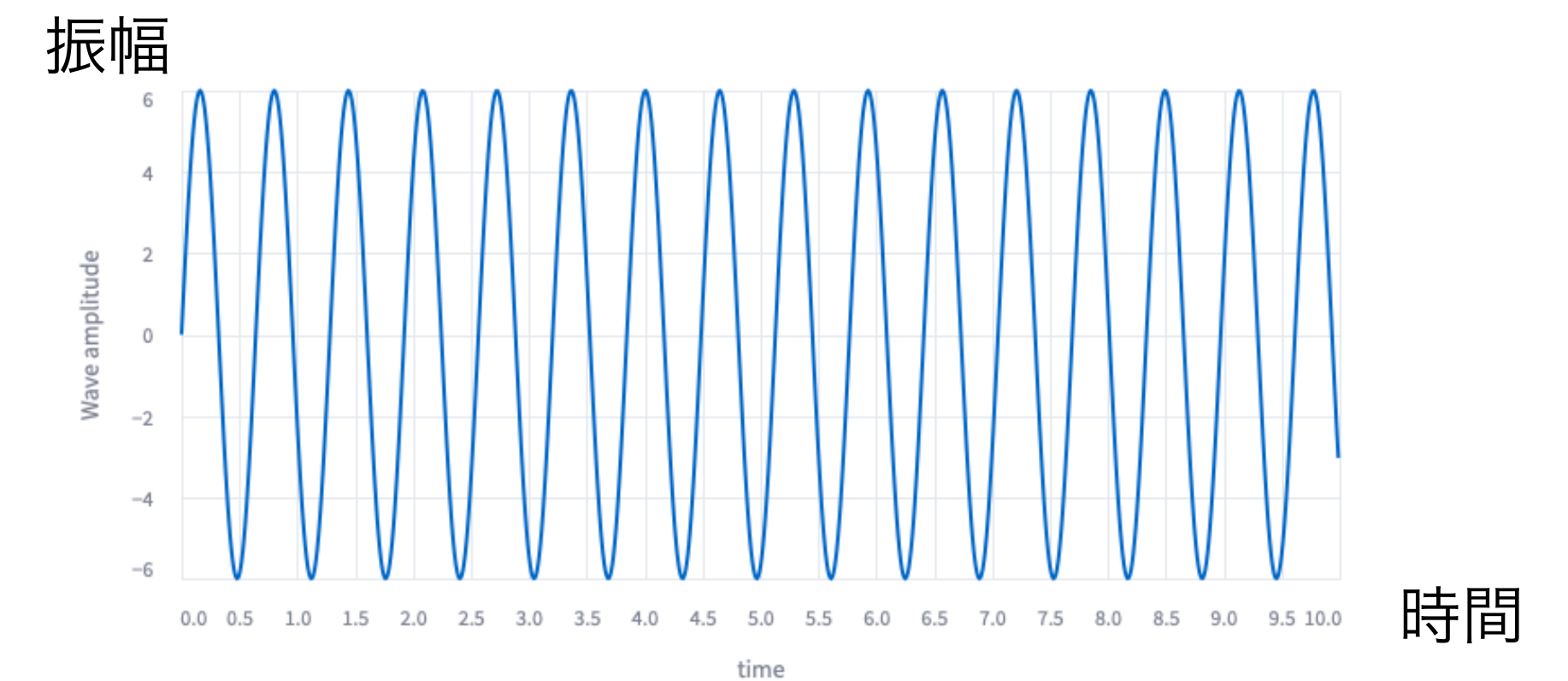
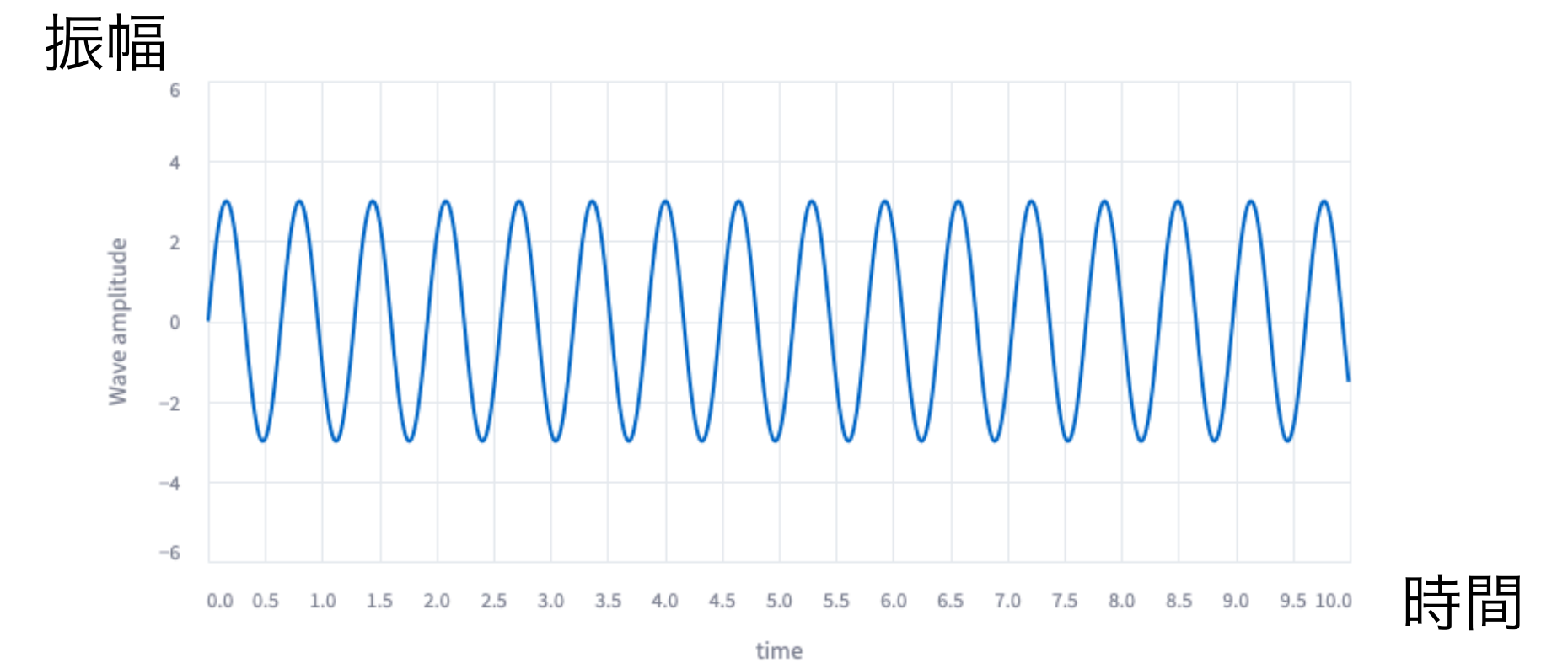
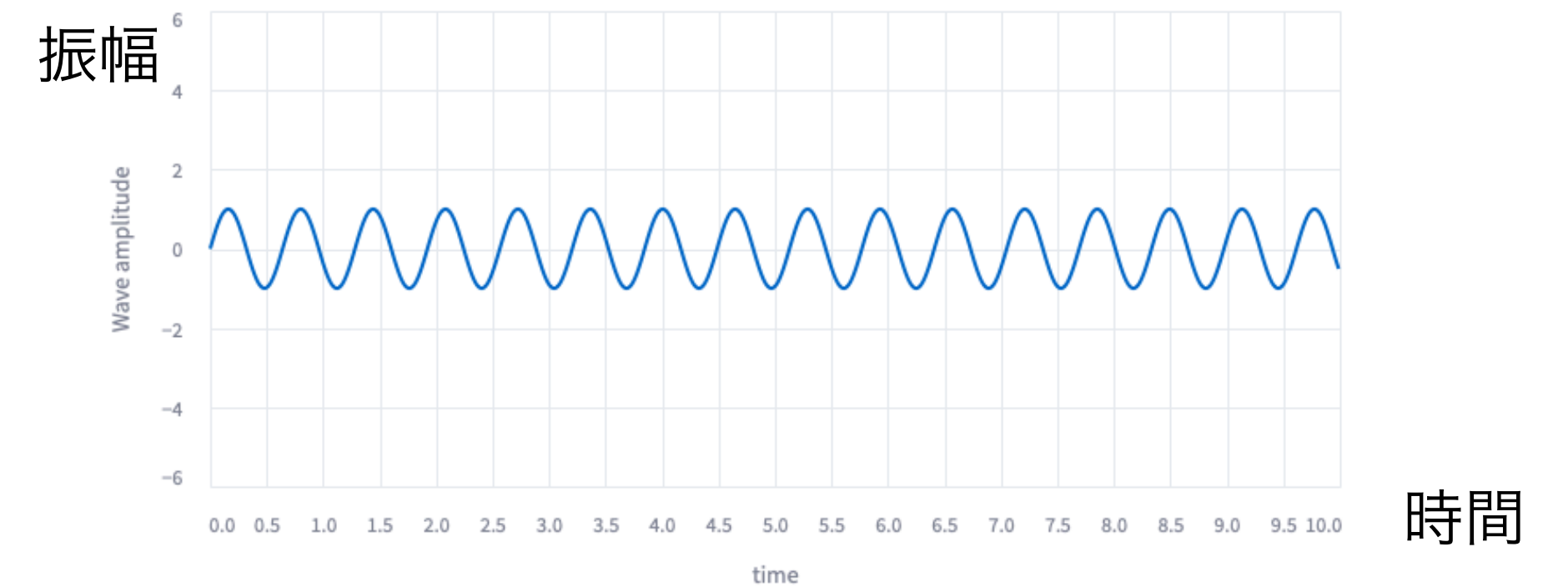


この波の音
再生中▶



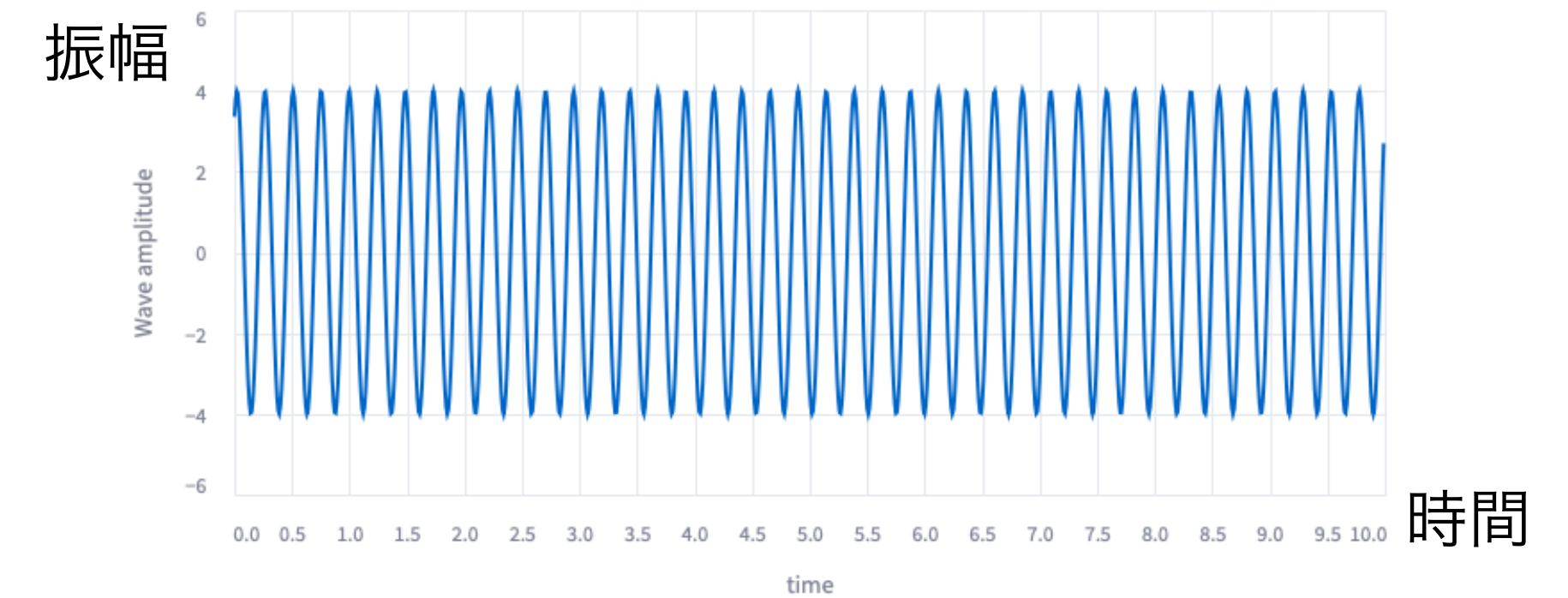
クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

You may hear the sound wave plotted above makes here.



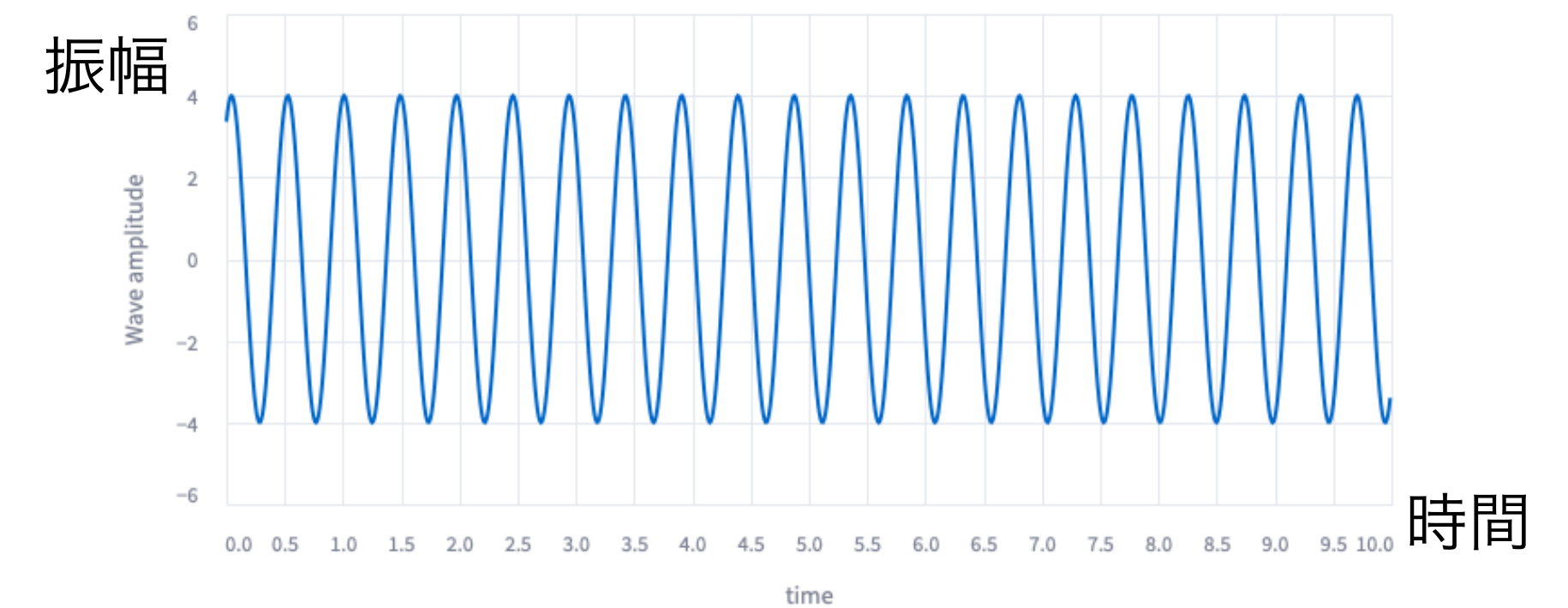
波の振動数(周波数)

この波の音を
聴いてみよう▶

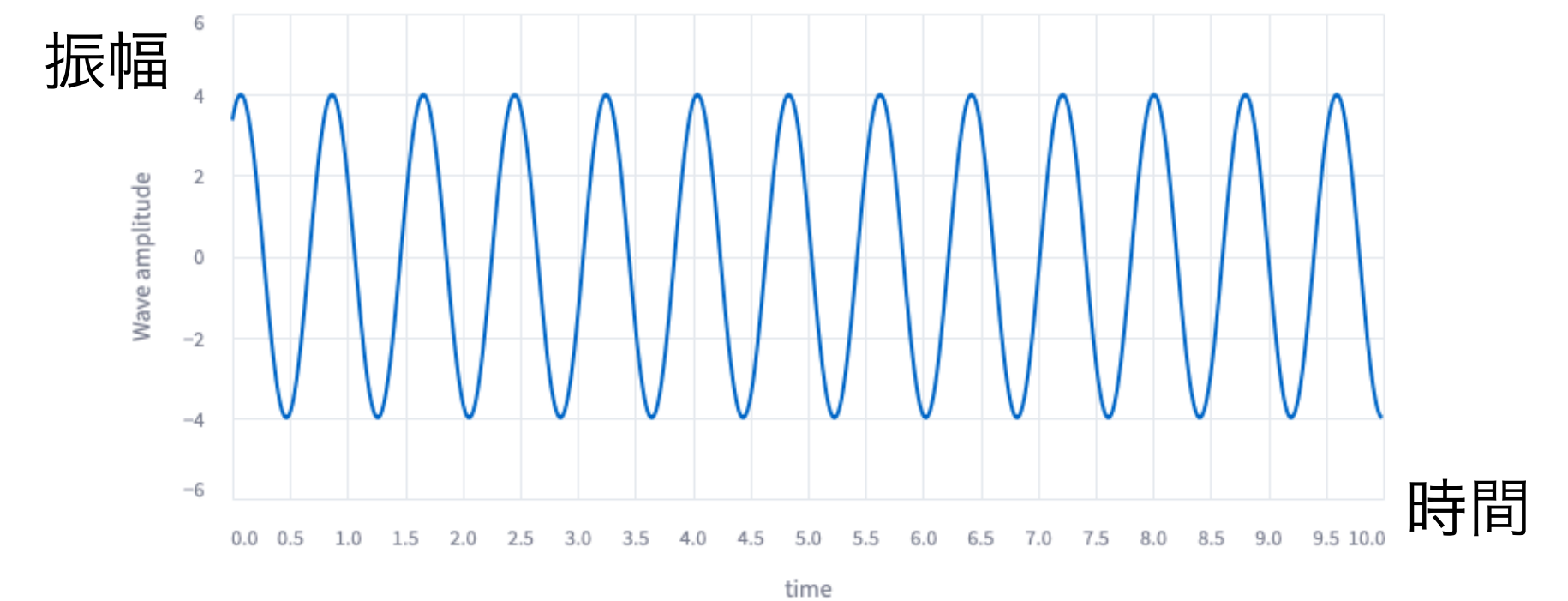


波の振動数(周波数)を変えると
音の高さが変わるよ.

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
再生中▶



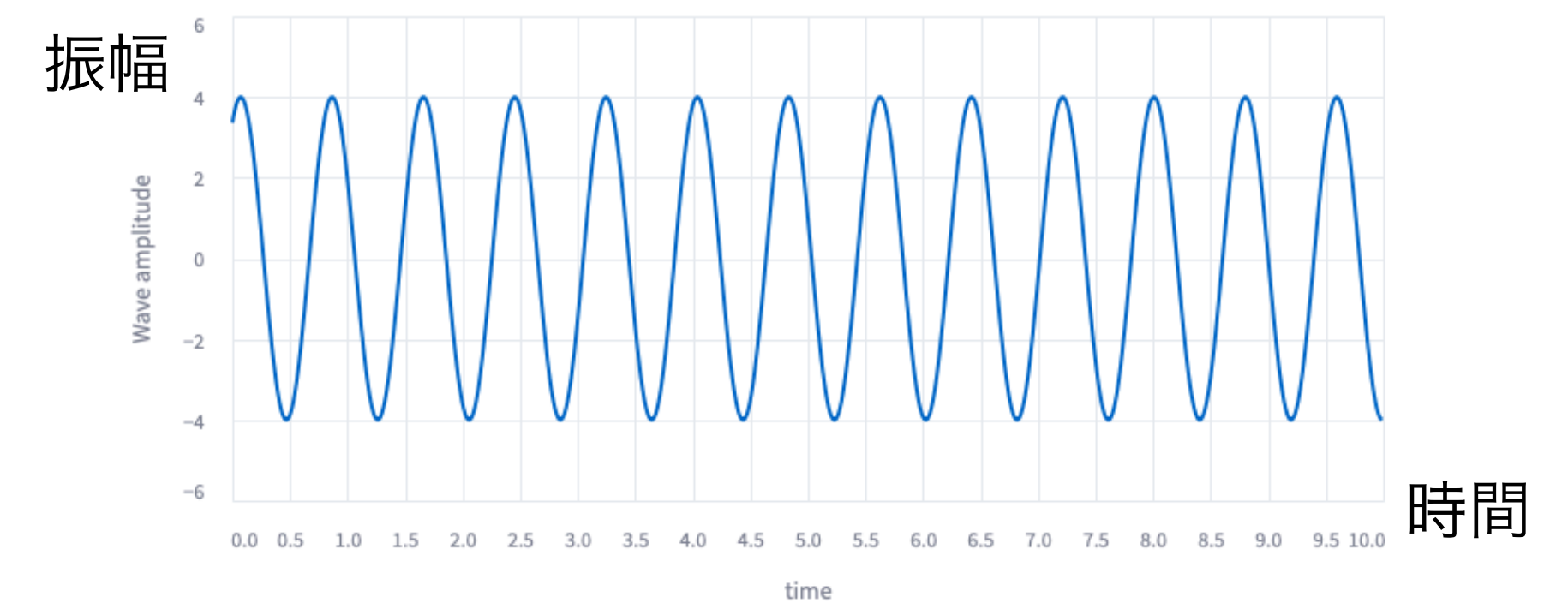
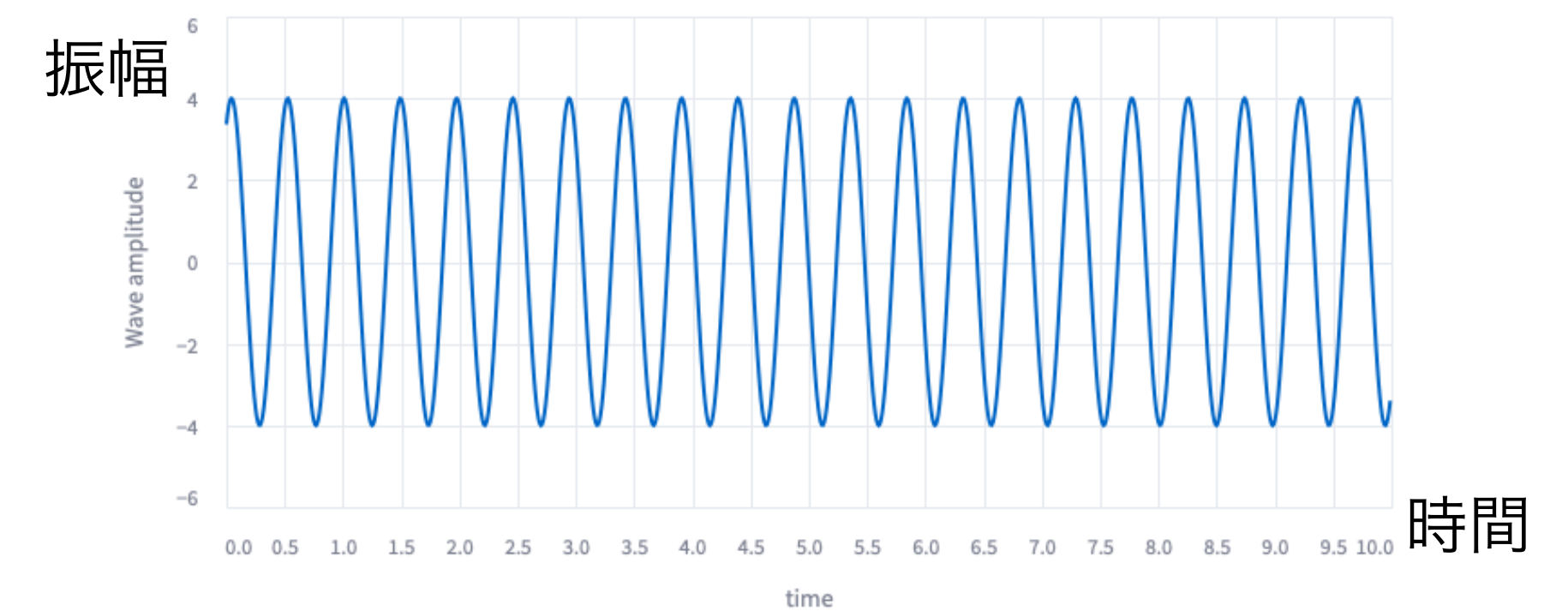
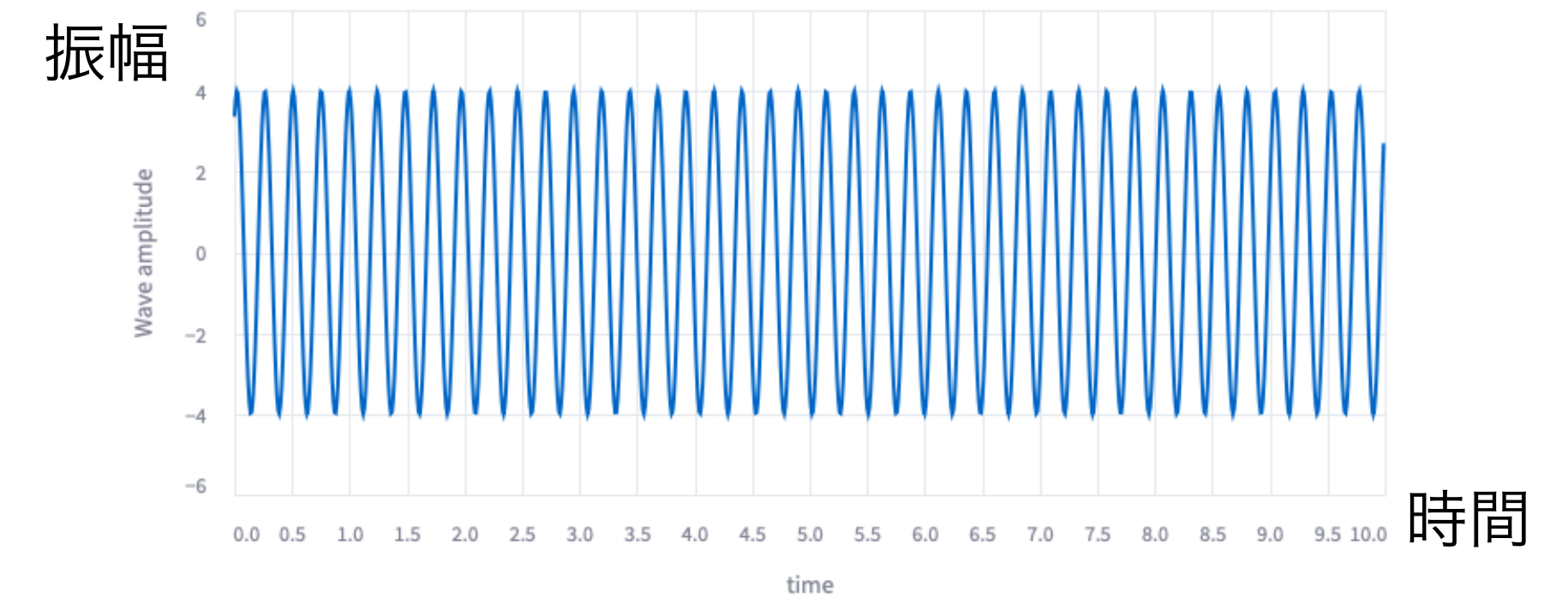
この波の音を
聴いてみよう▶



この波の音を
聴いてみよう▶

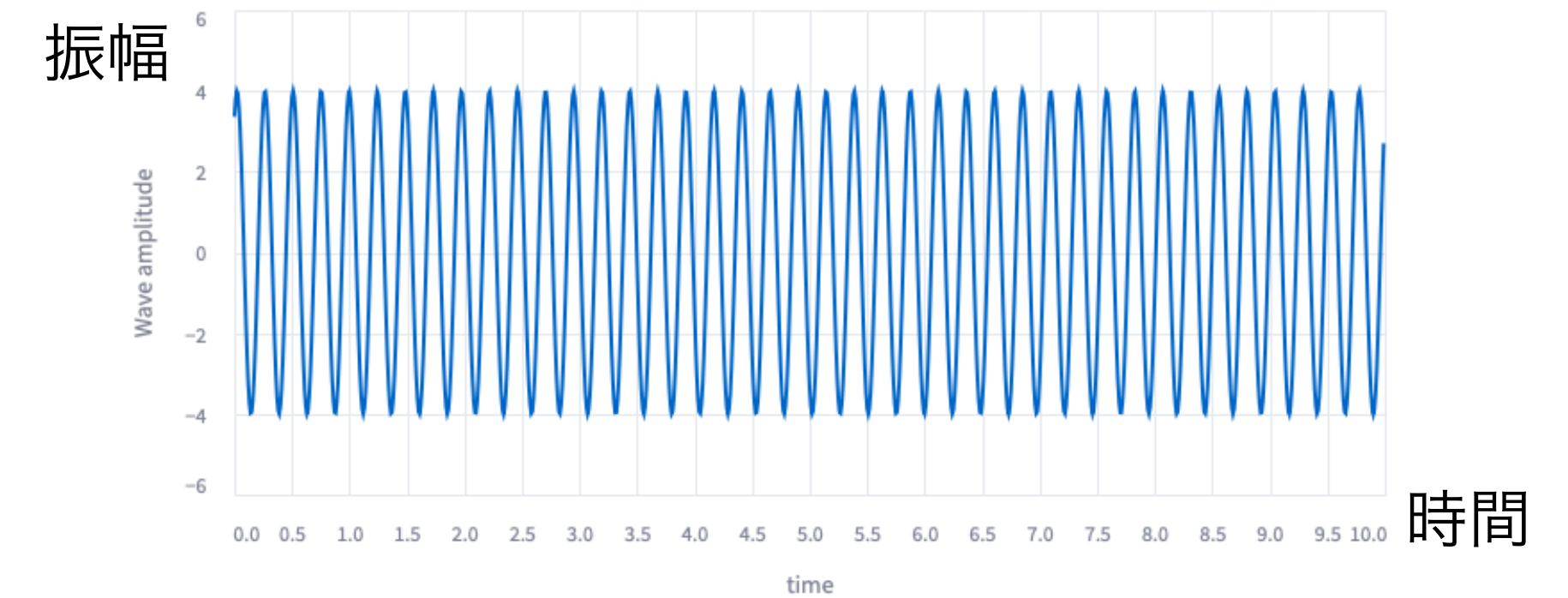


クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。
You may hear the sound wave plotted above makes here.



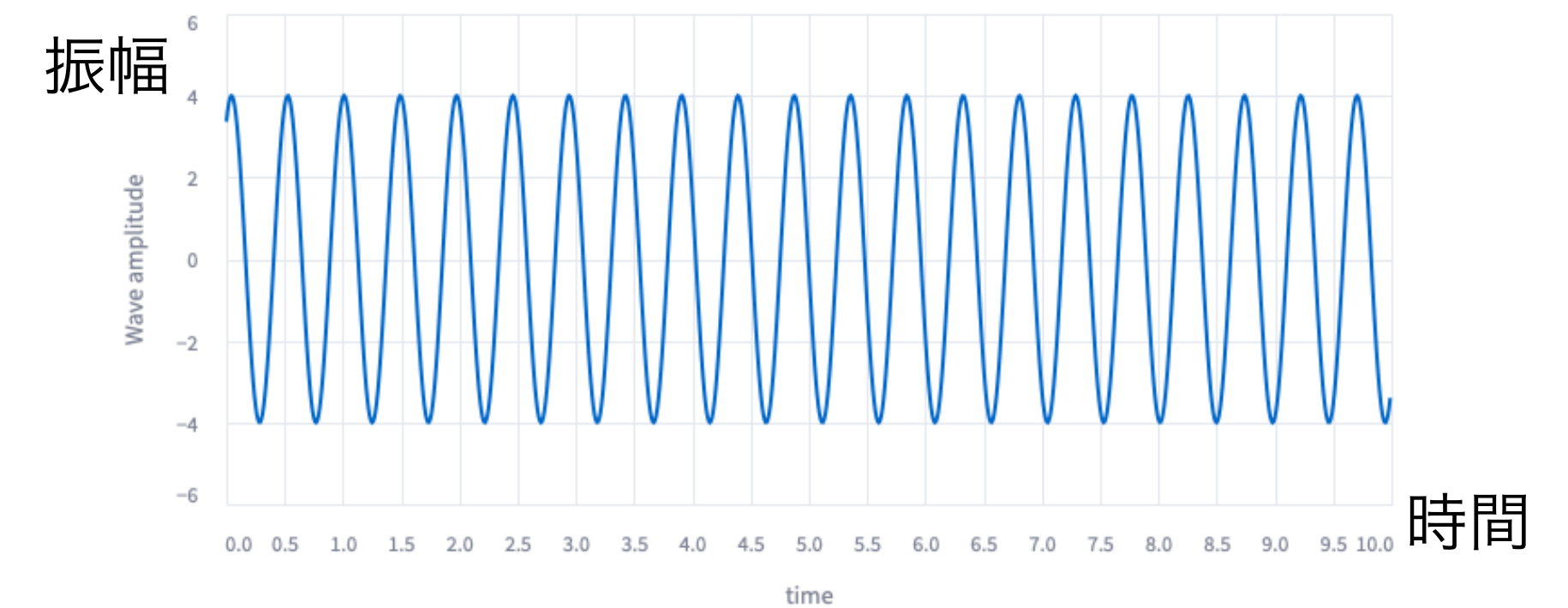
波の振動数(周波数)

この波の音を
聴いてみよう▶

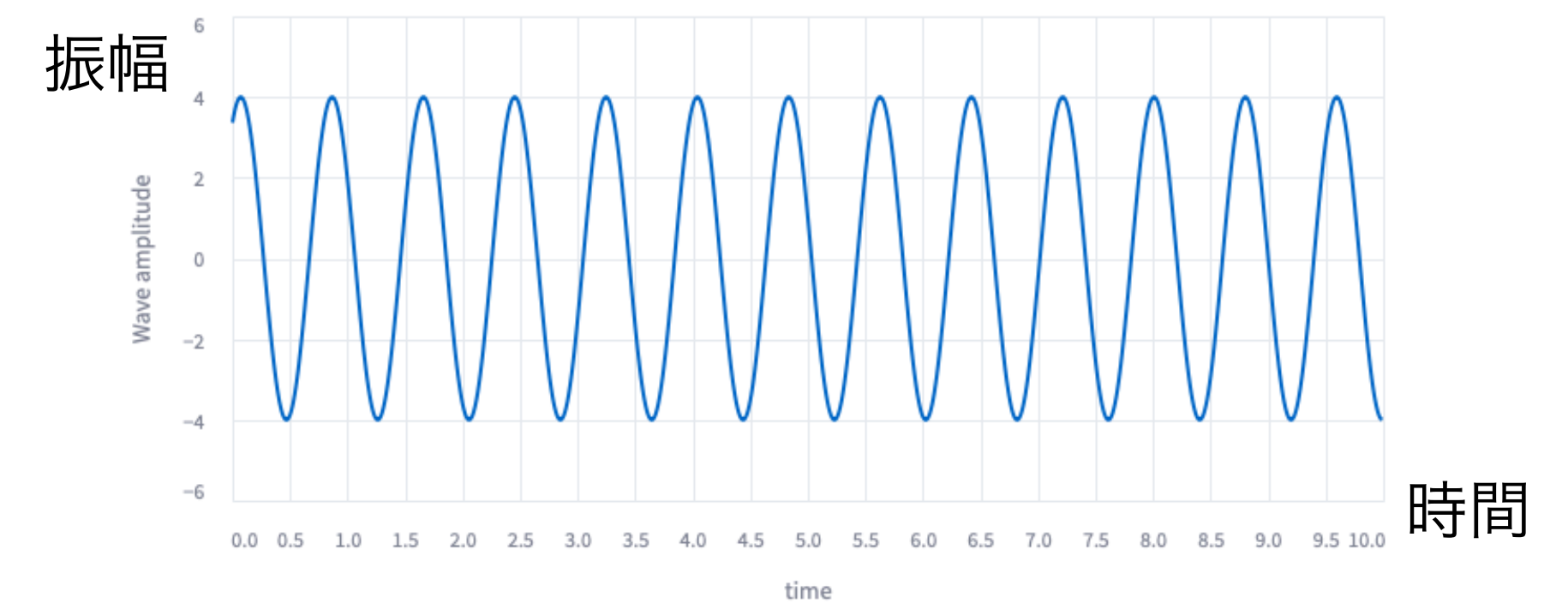


波の振動数(周波数)を変えると
音の高さが変わるよ.

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▶

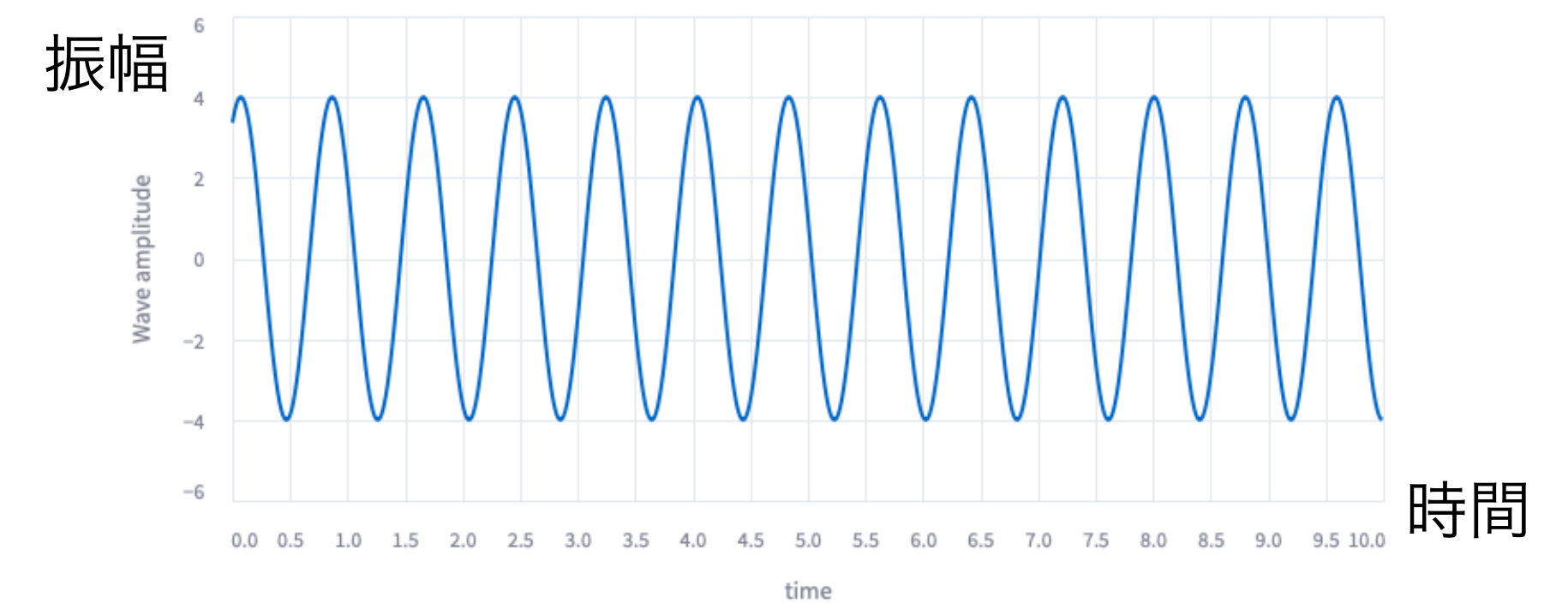
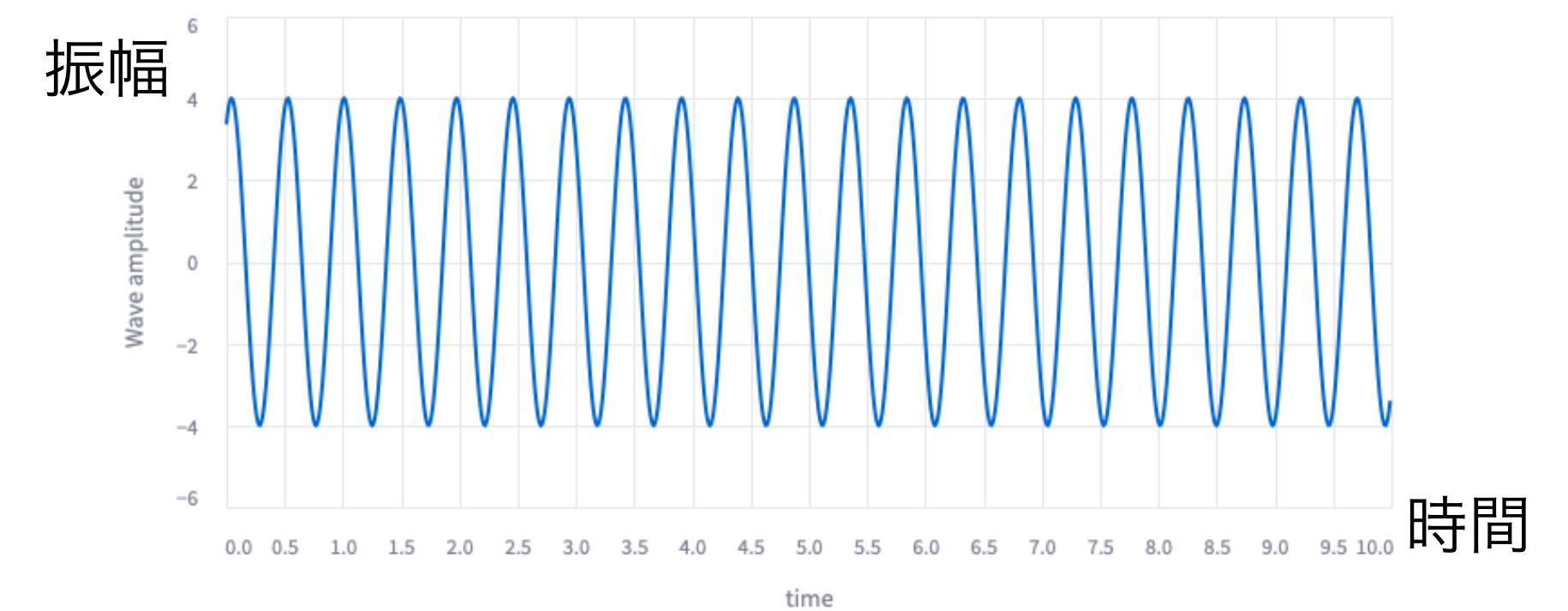
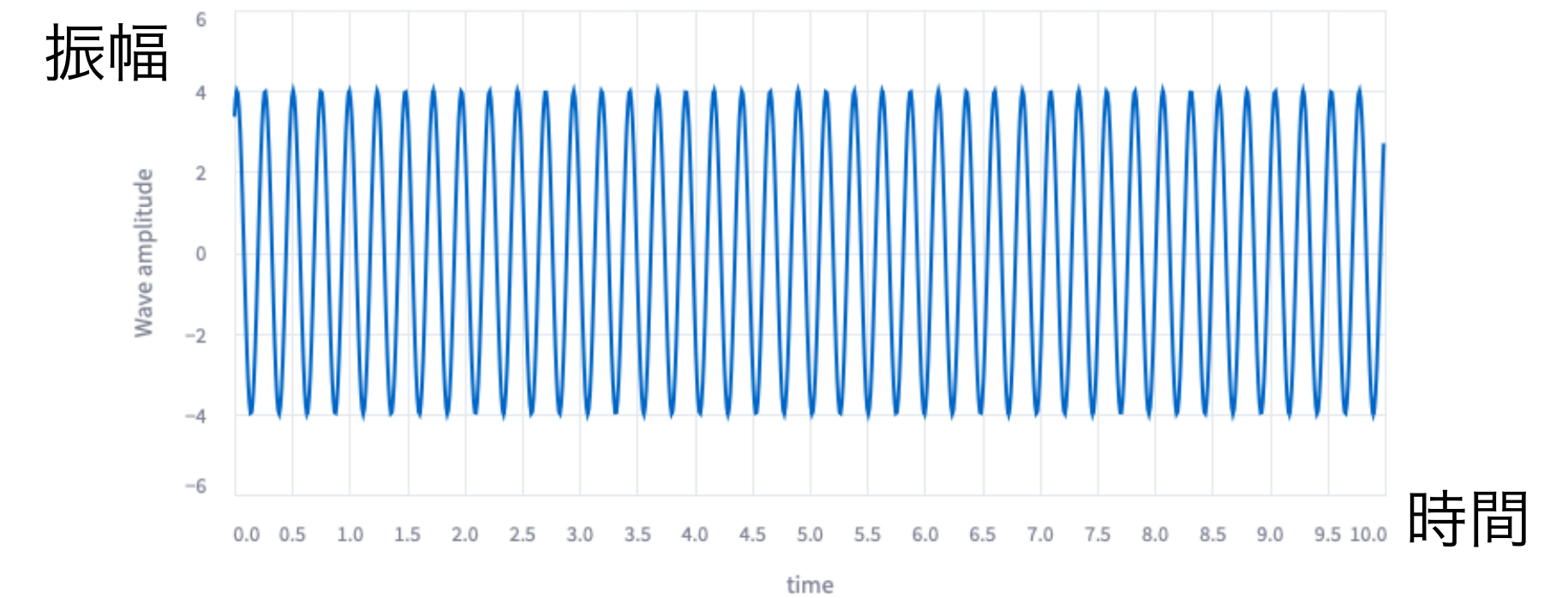


この波の音
再生中▶



クリックすると、上のグラフの波が音として聞こえます。

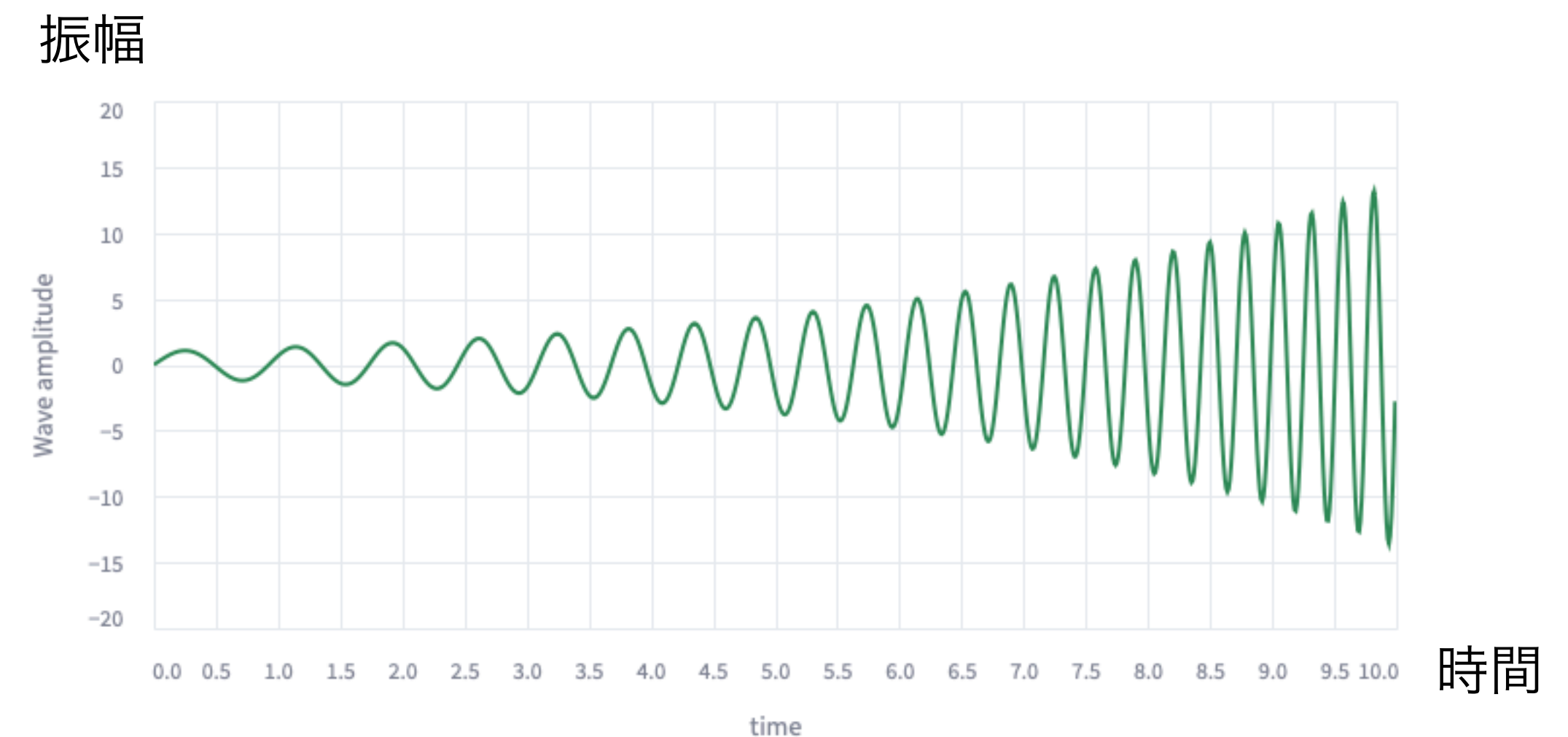
You may hear the sound wave plotted above makes here.



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。

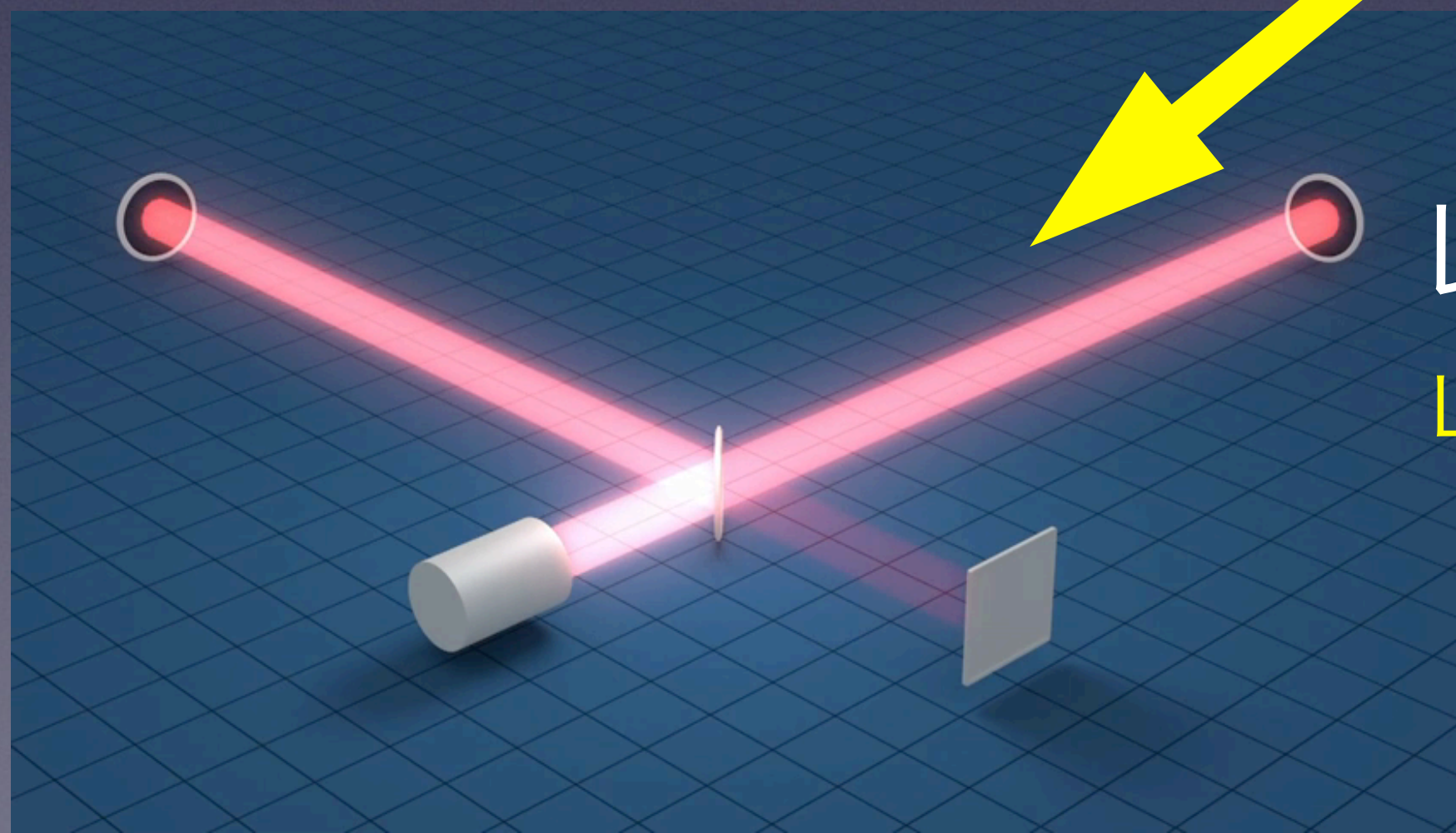
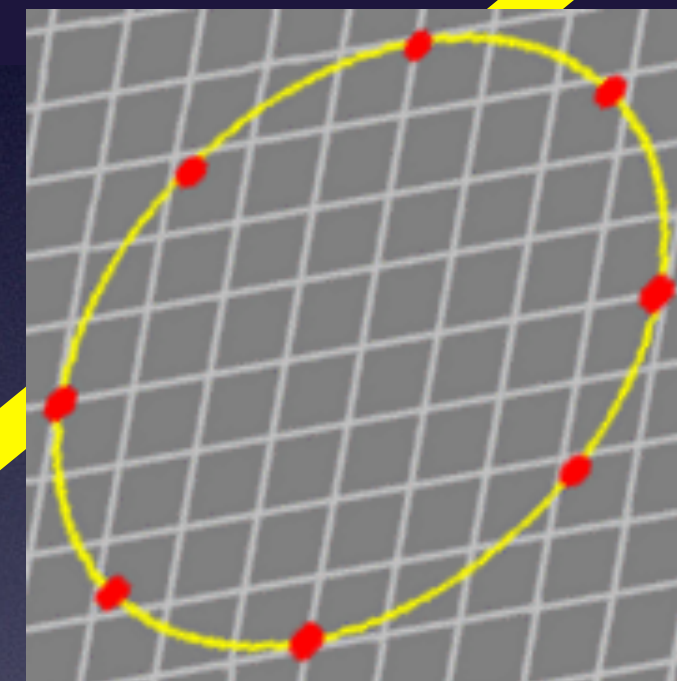
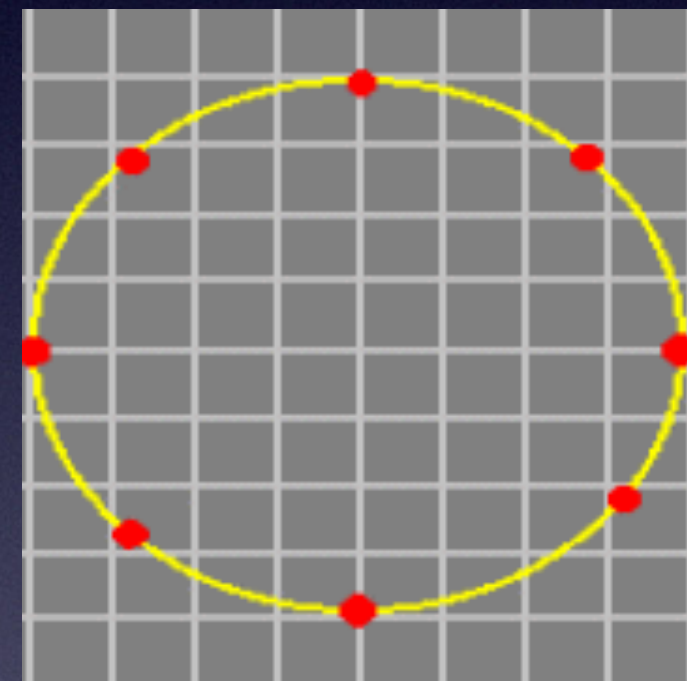
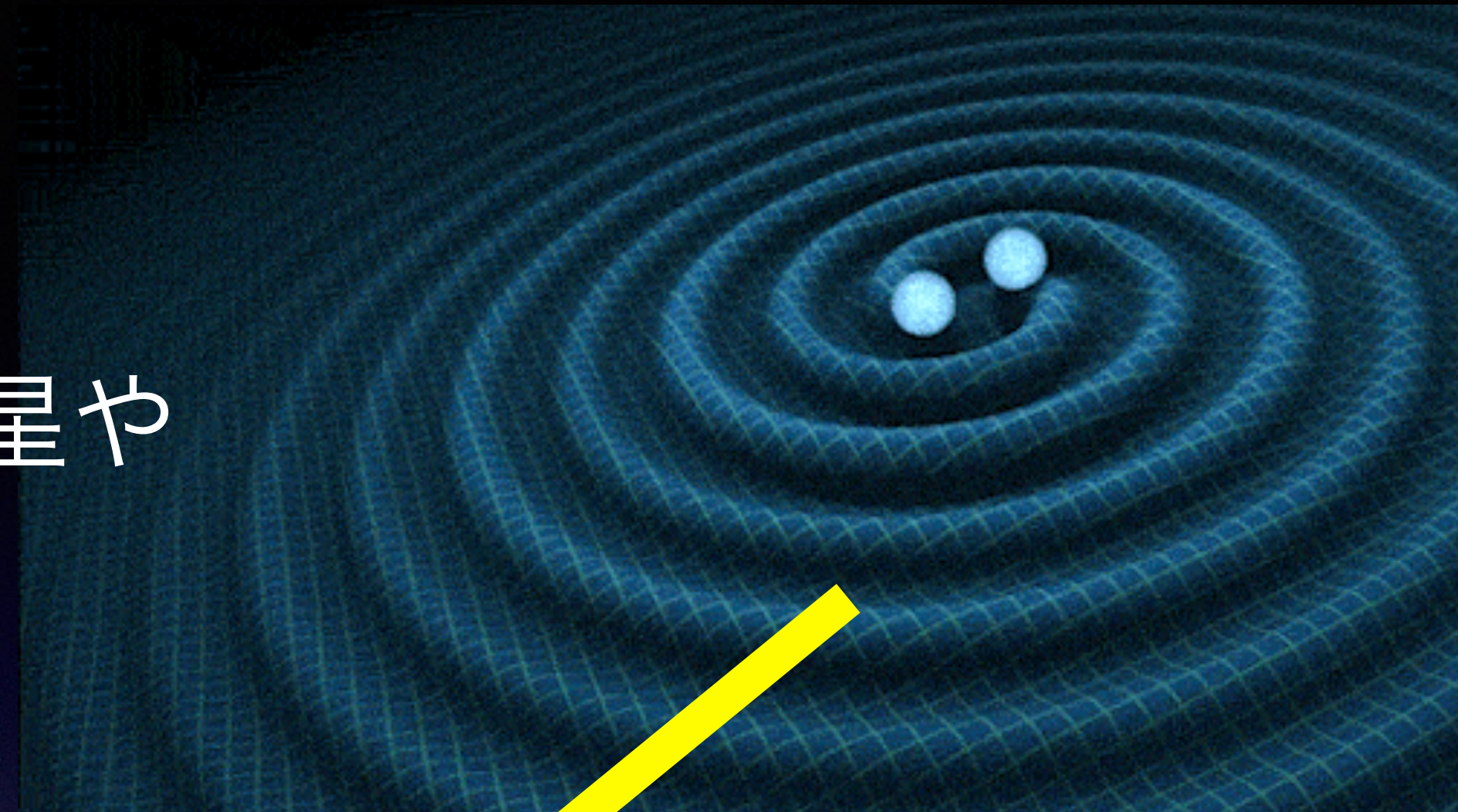
This is called a chirp, being similar to the sound some birds make.

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

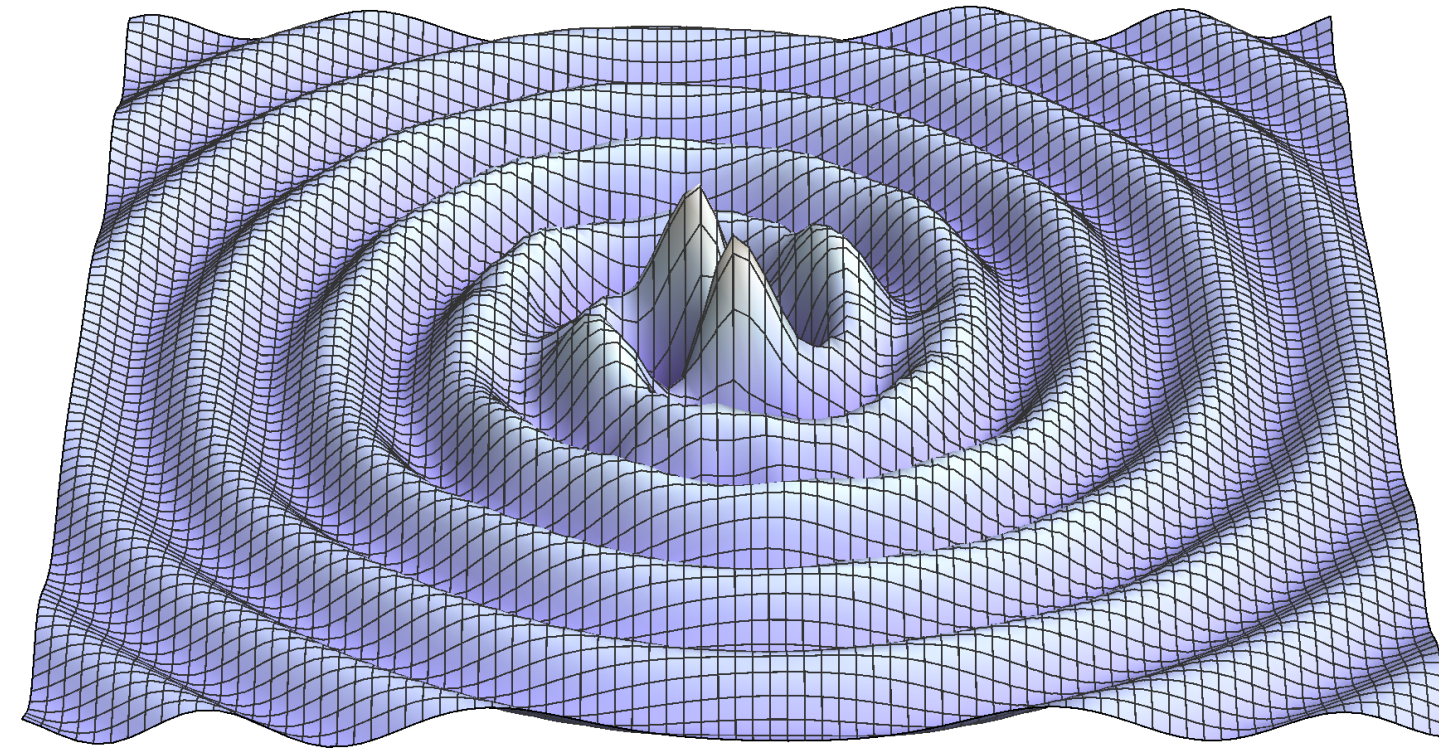
ブラックホール連星や
中性子星連星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory



重力波の直接観測をしたい！

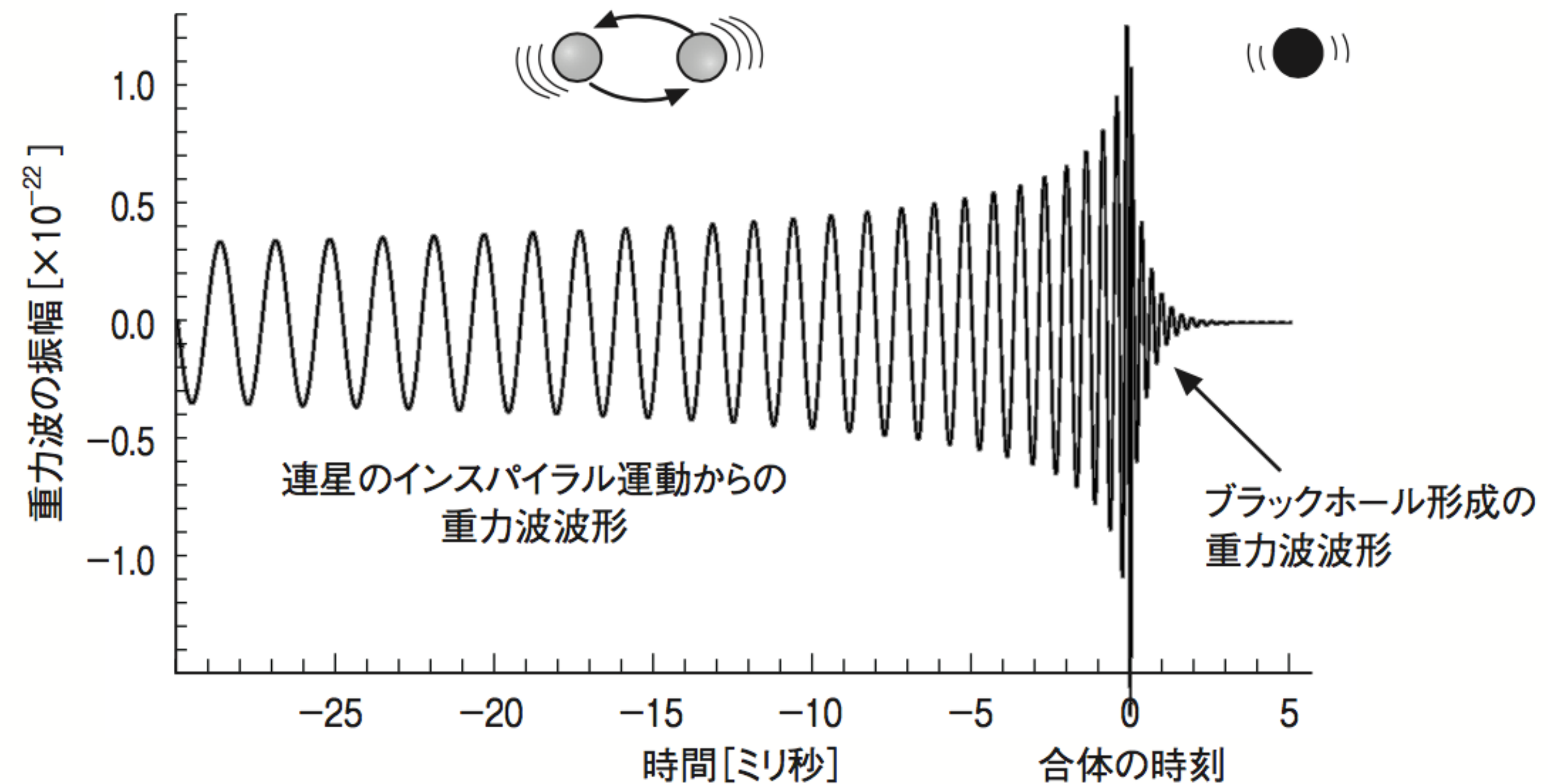
連星中性子星

連星ブラックホール

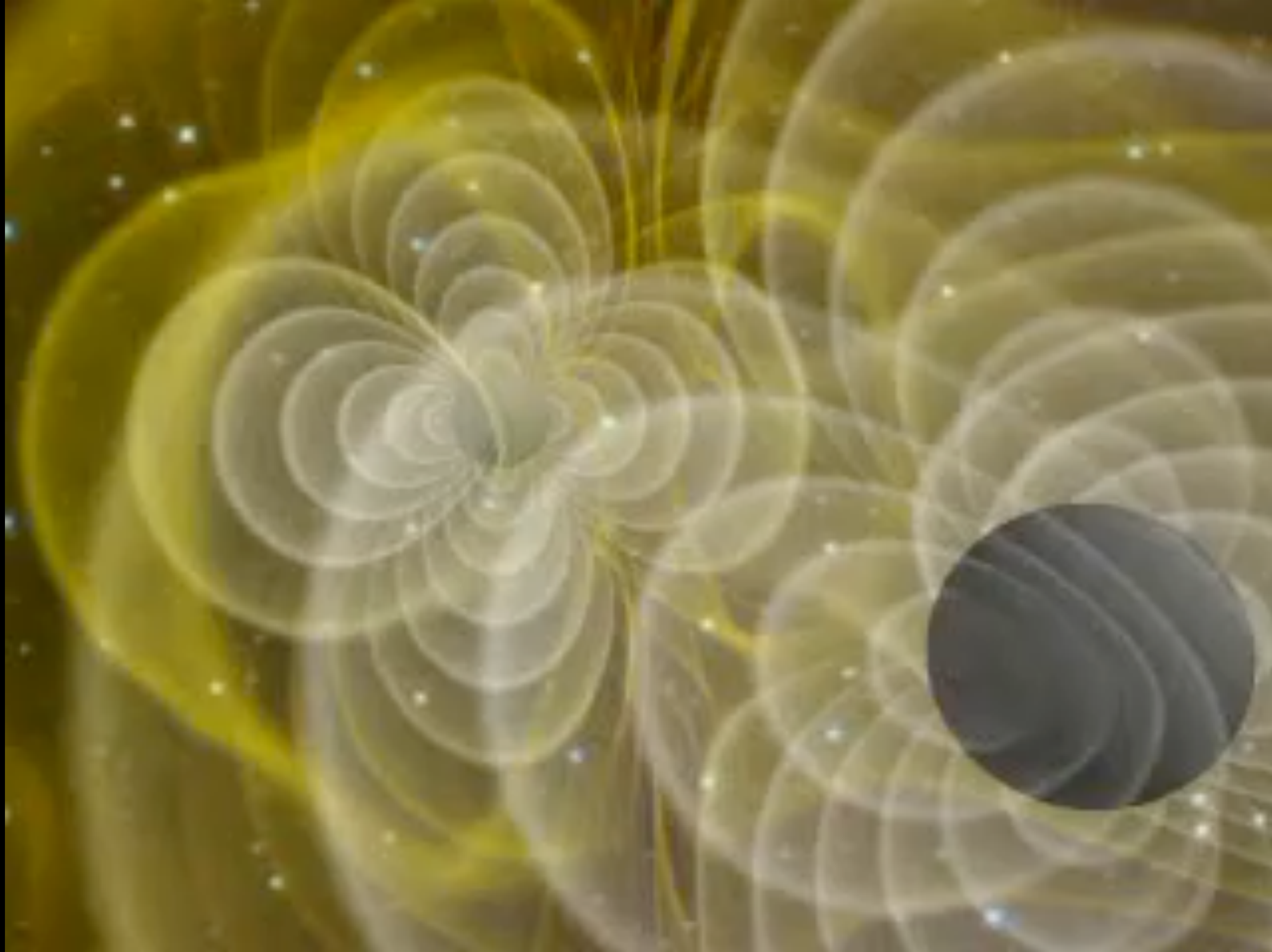
インスパイラル

合体

リングダウン

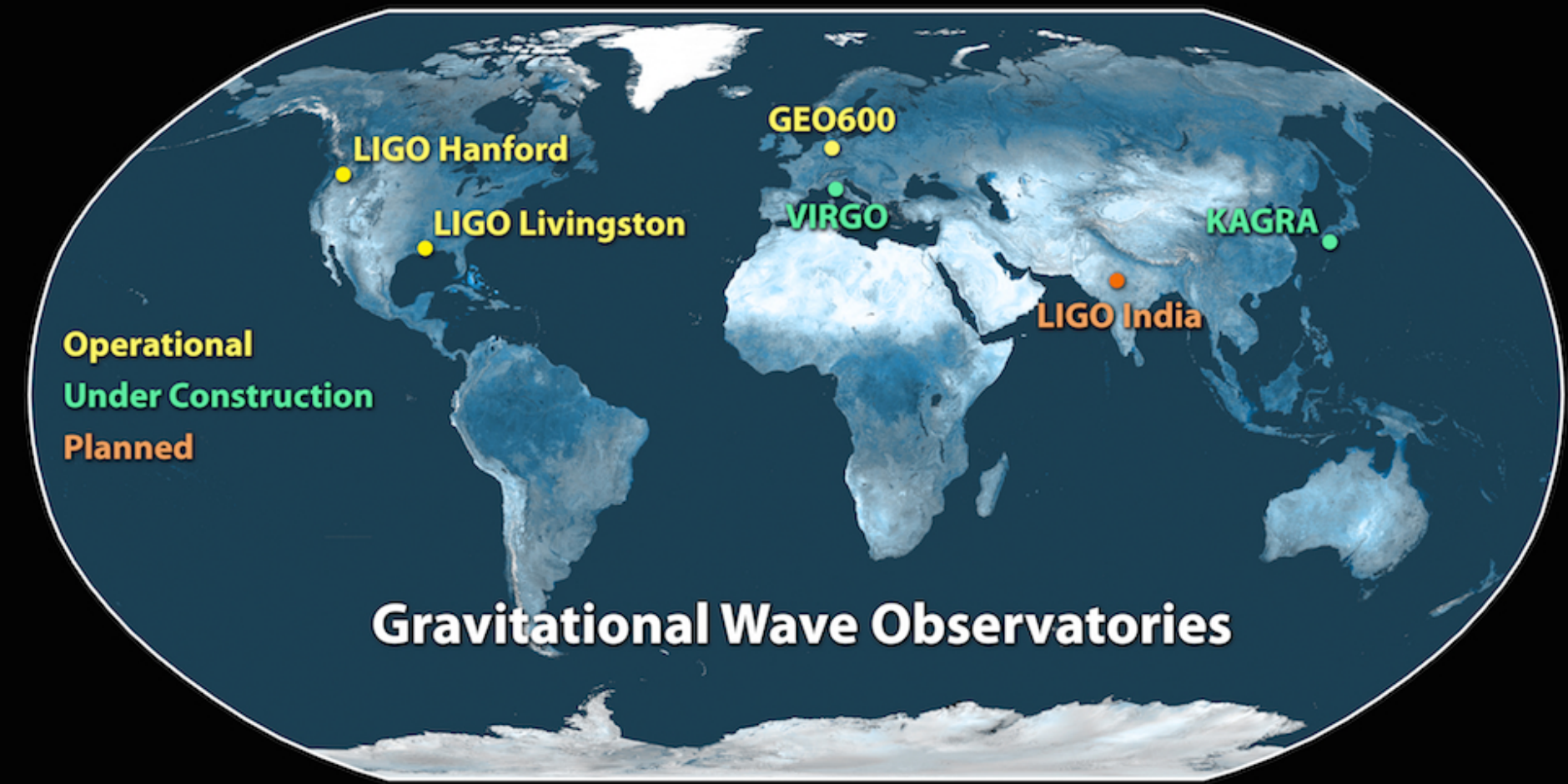
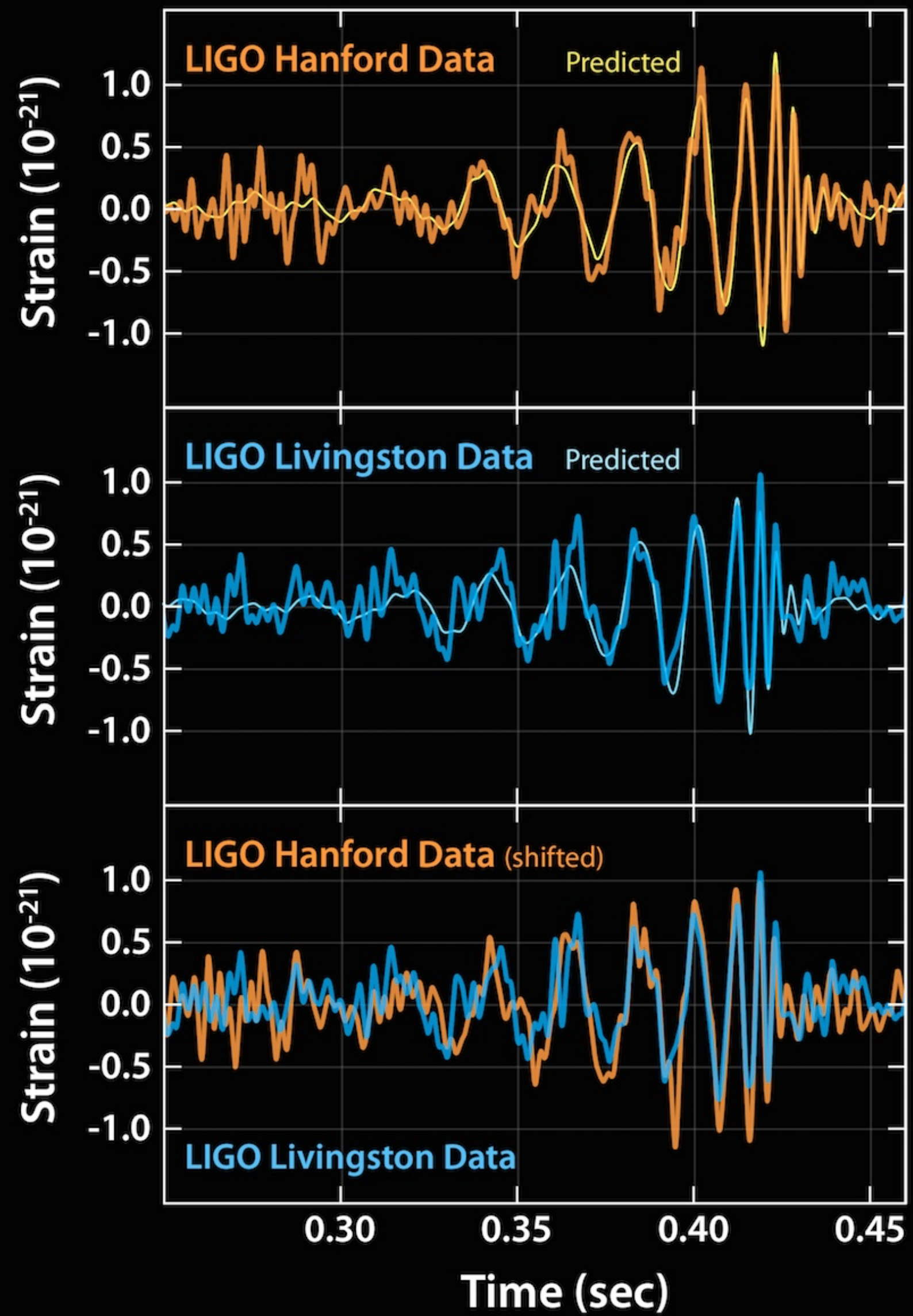


ブラックホールの合体シミュレーション

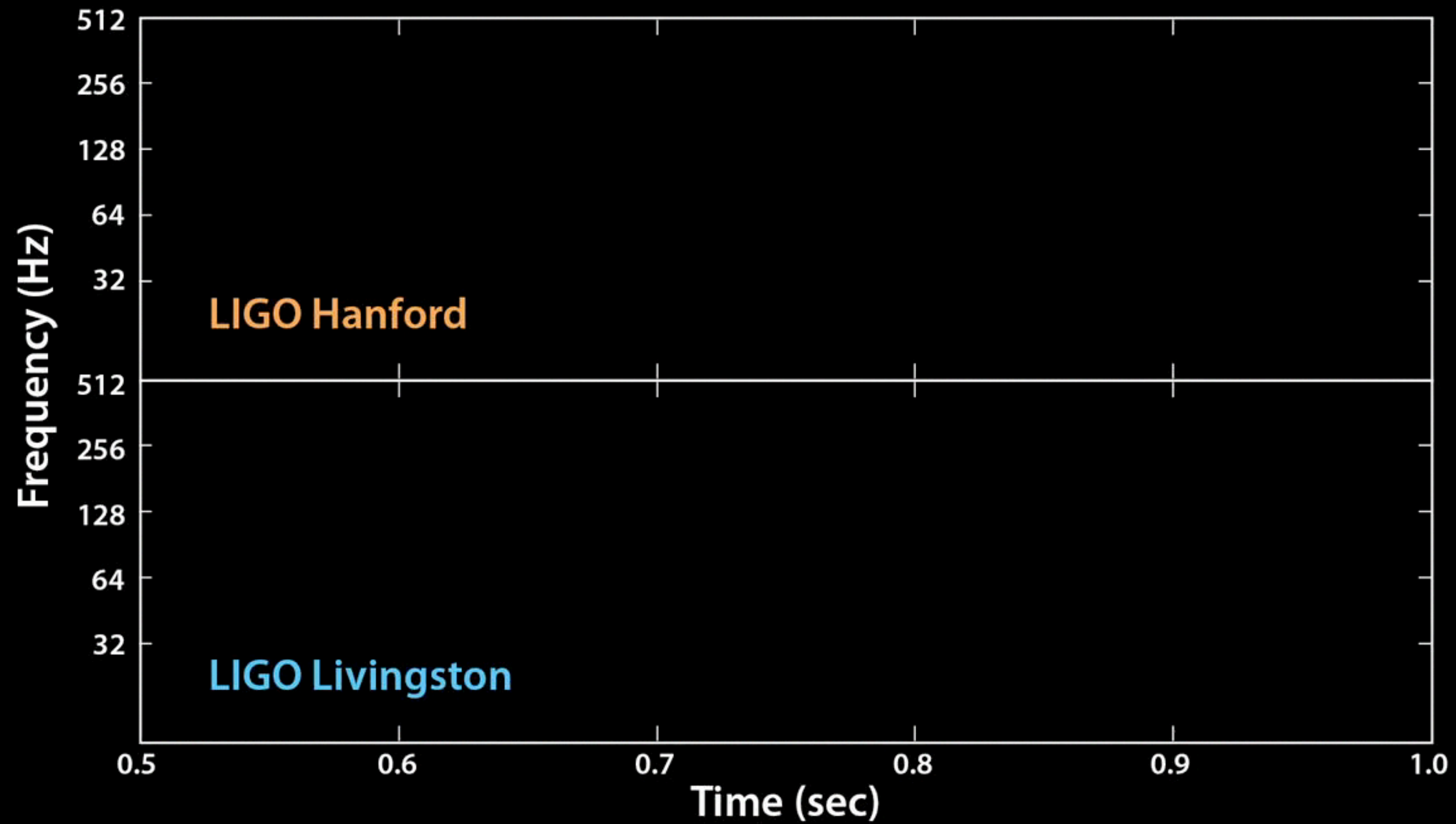


NCSA-AEI group (1998)

2015年9月14日



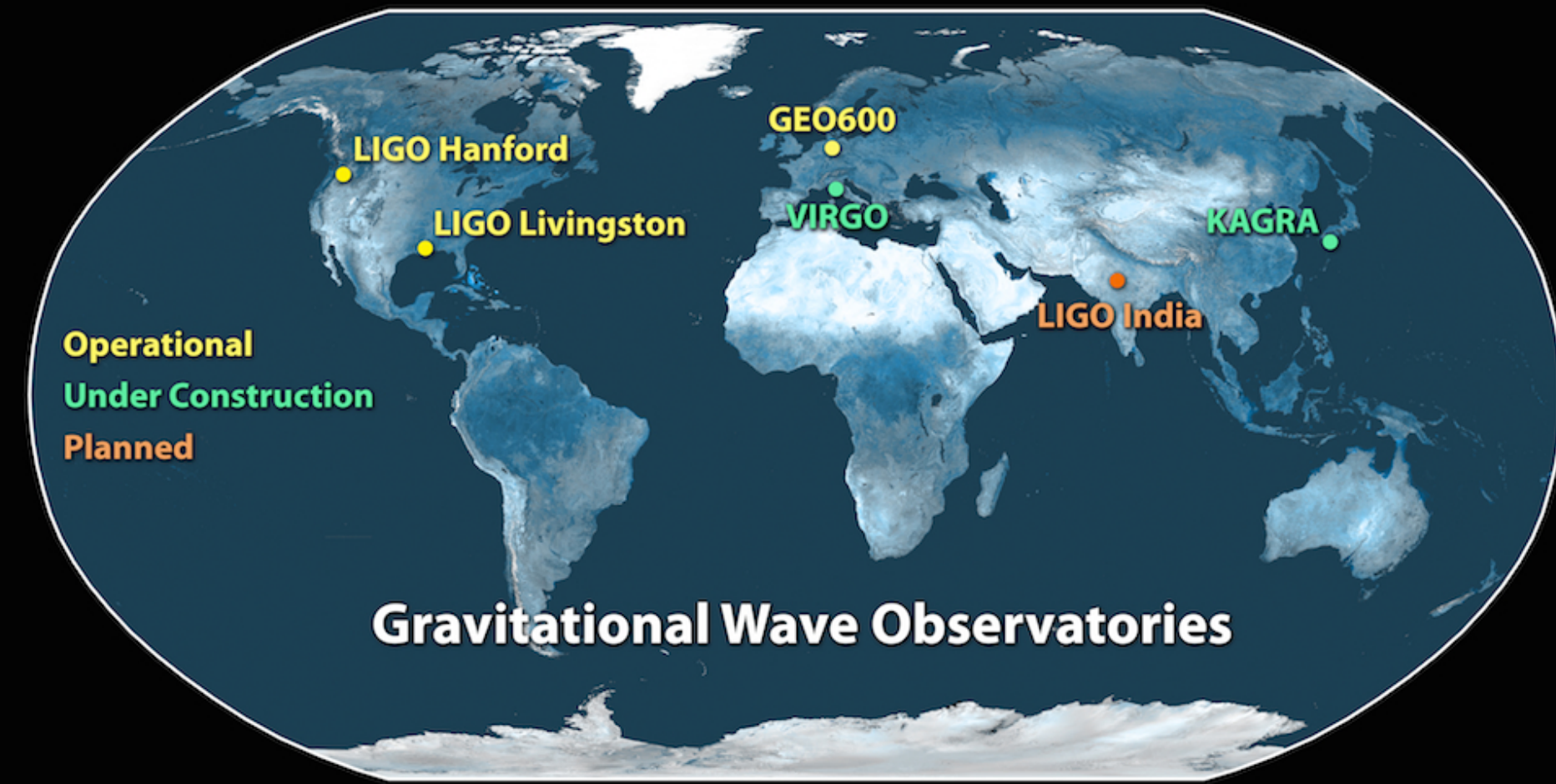
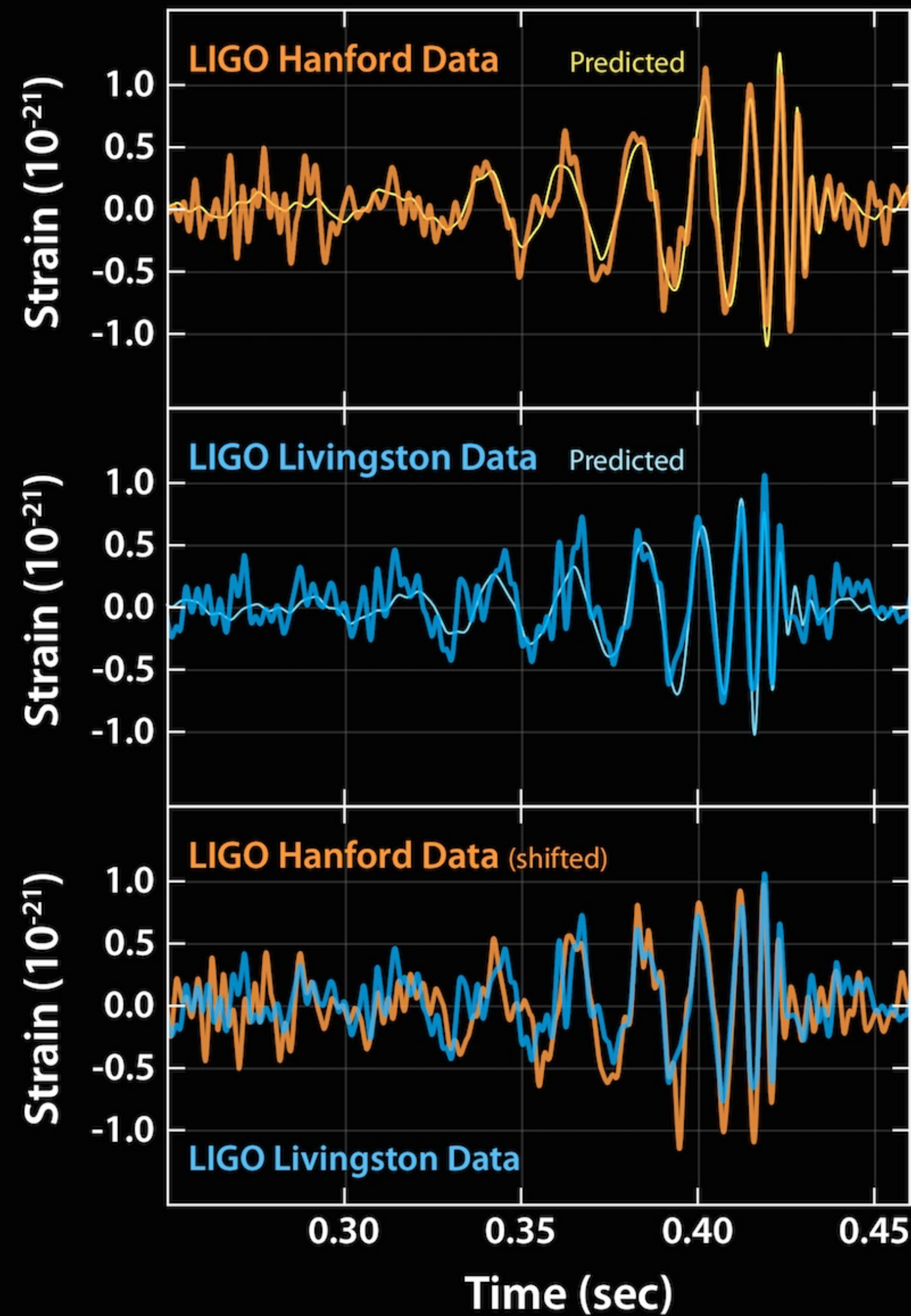
重力波波形を音にすると. . .



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

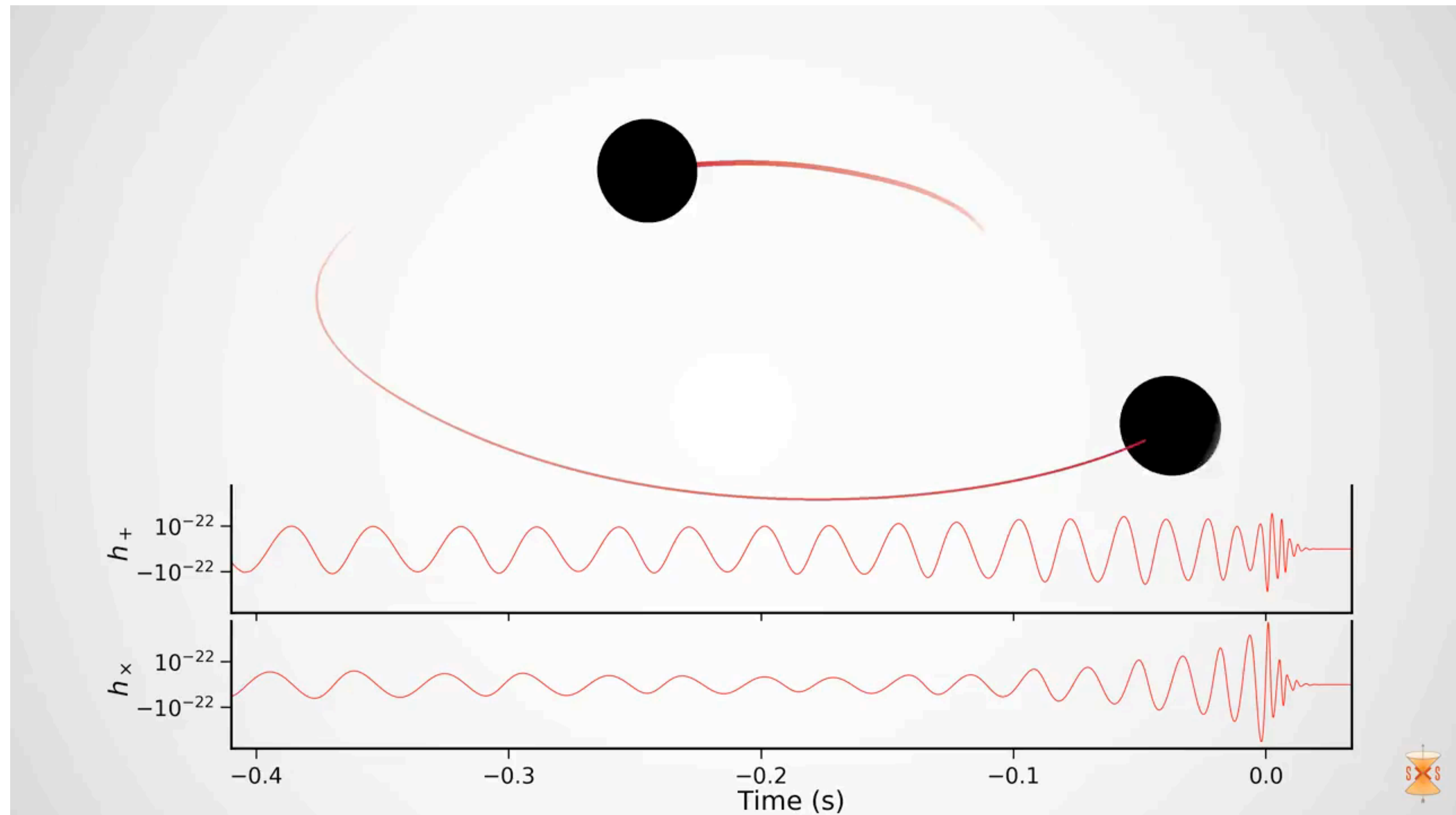


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先

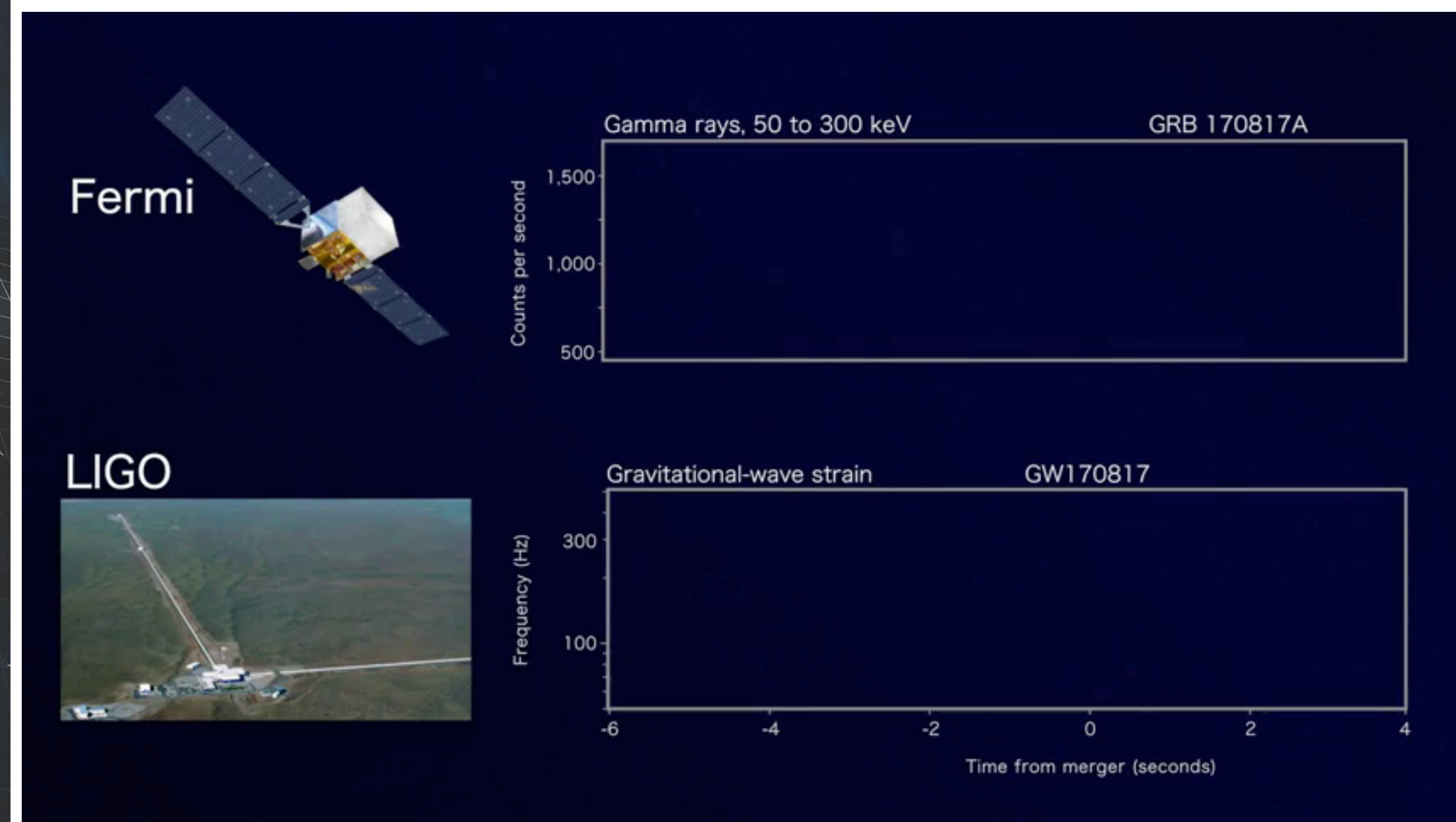
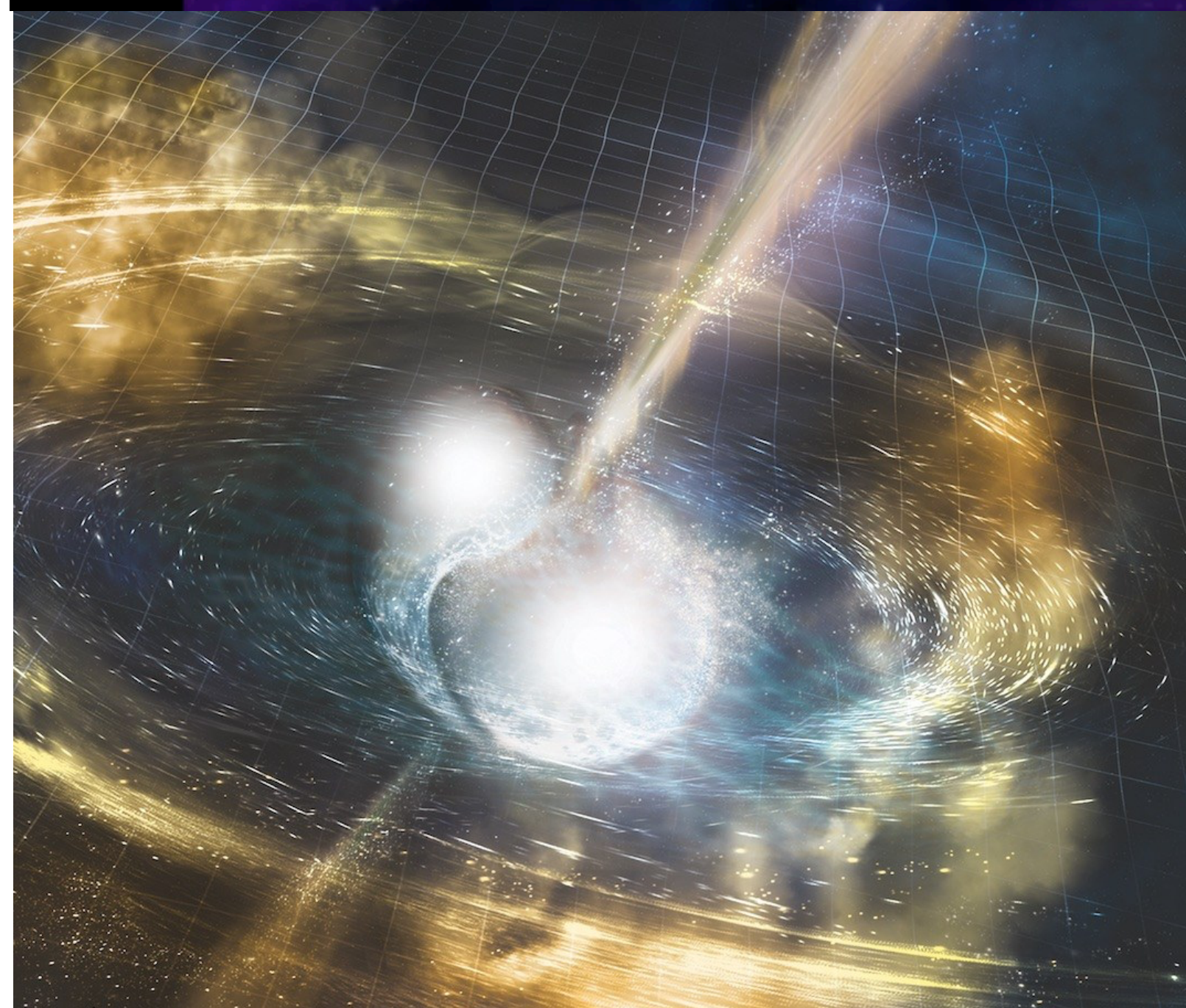
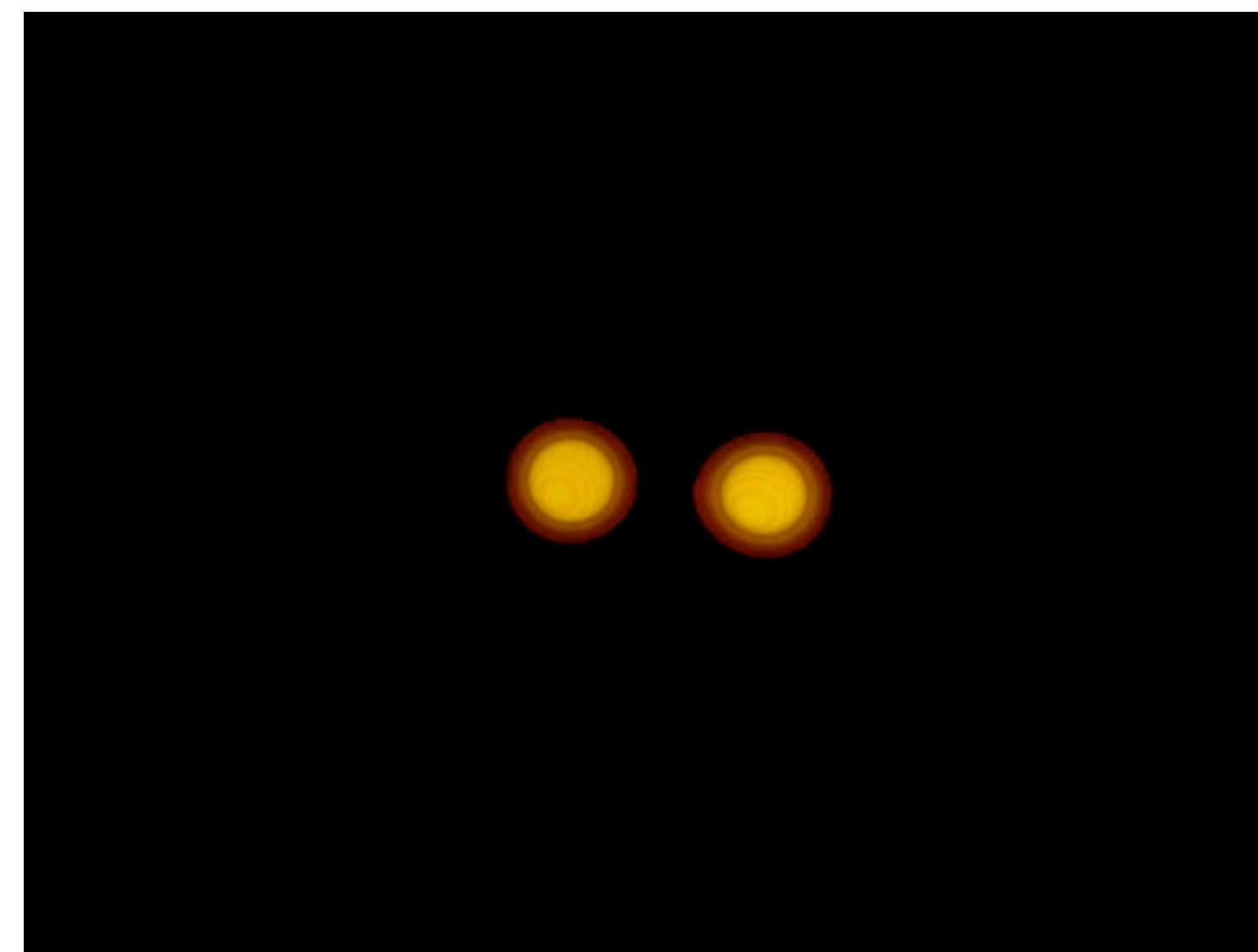


Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown 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.

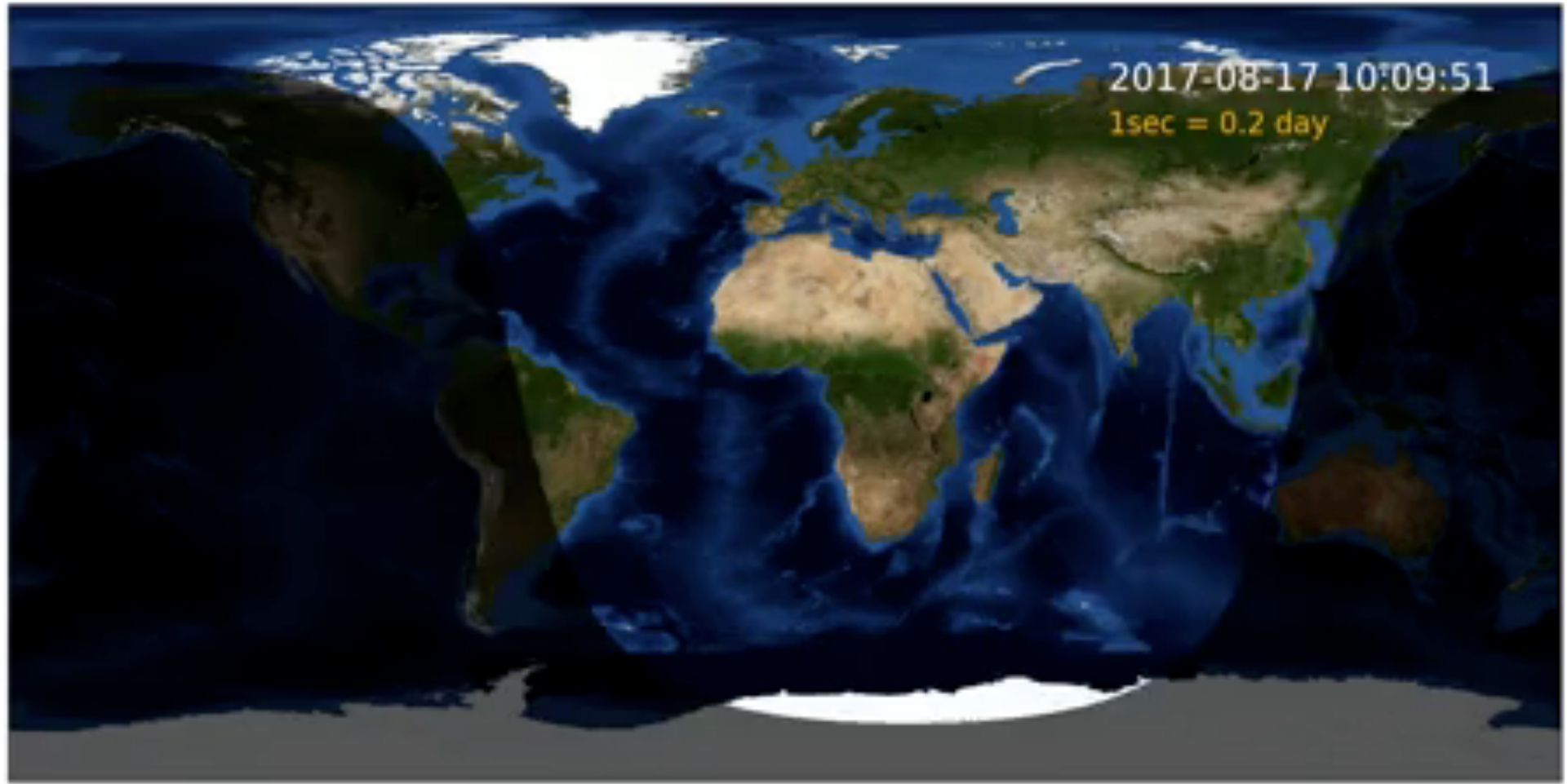
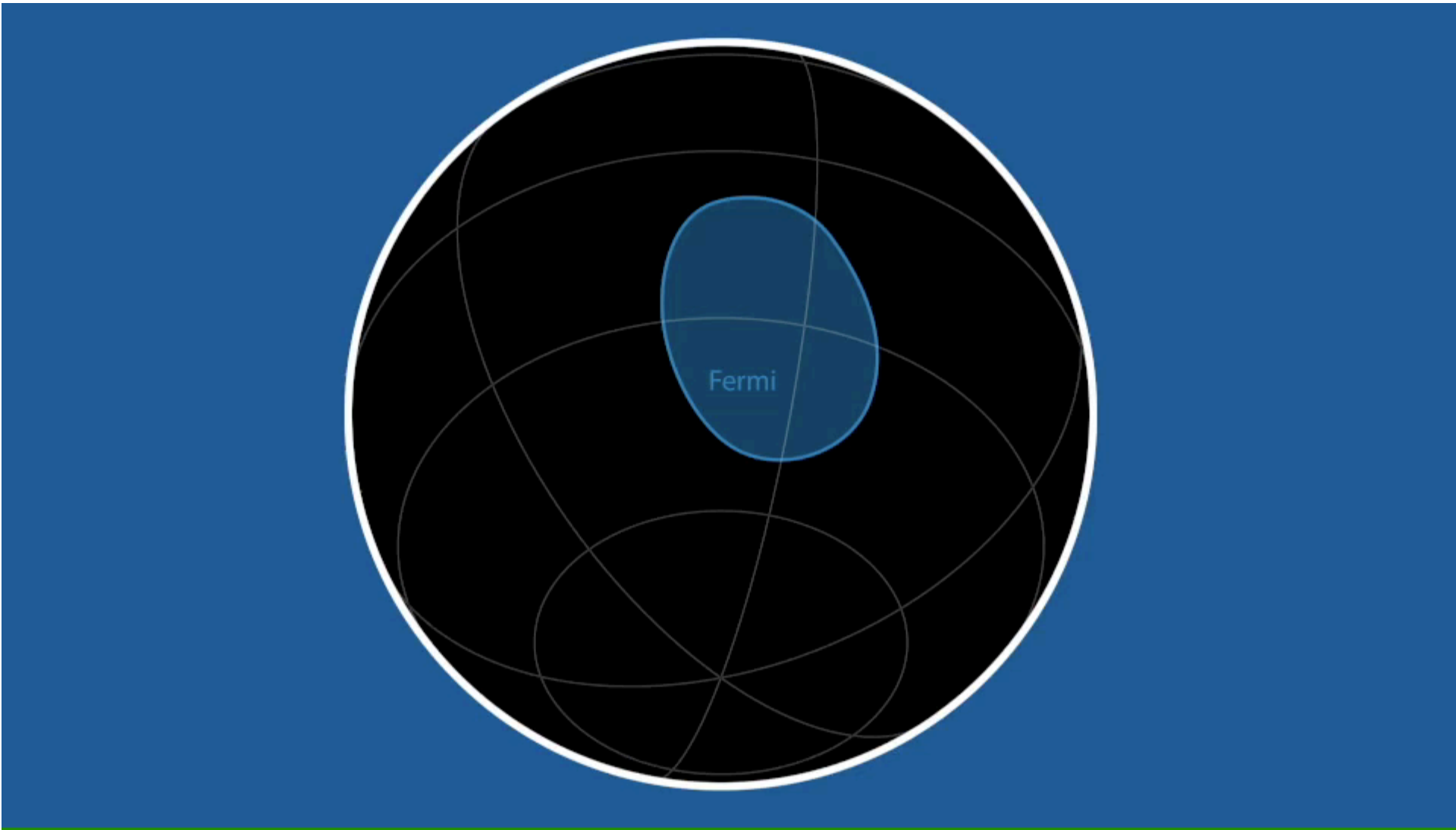
The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation 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>

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) !

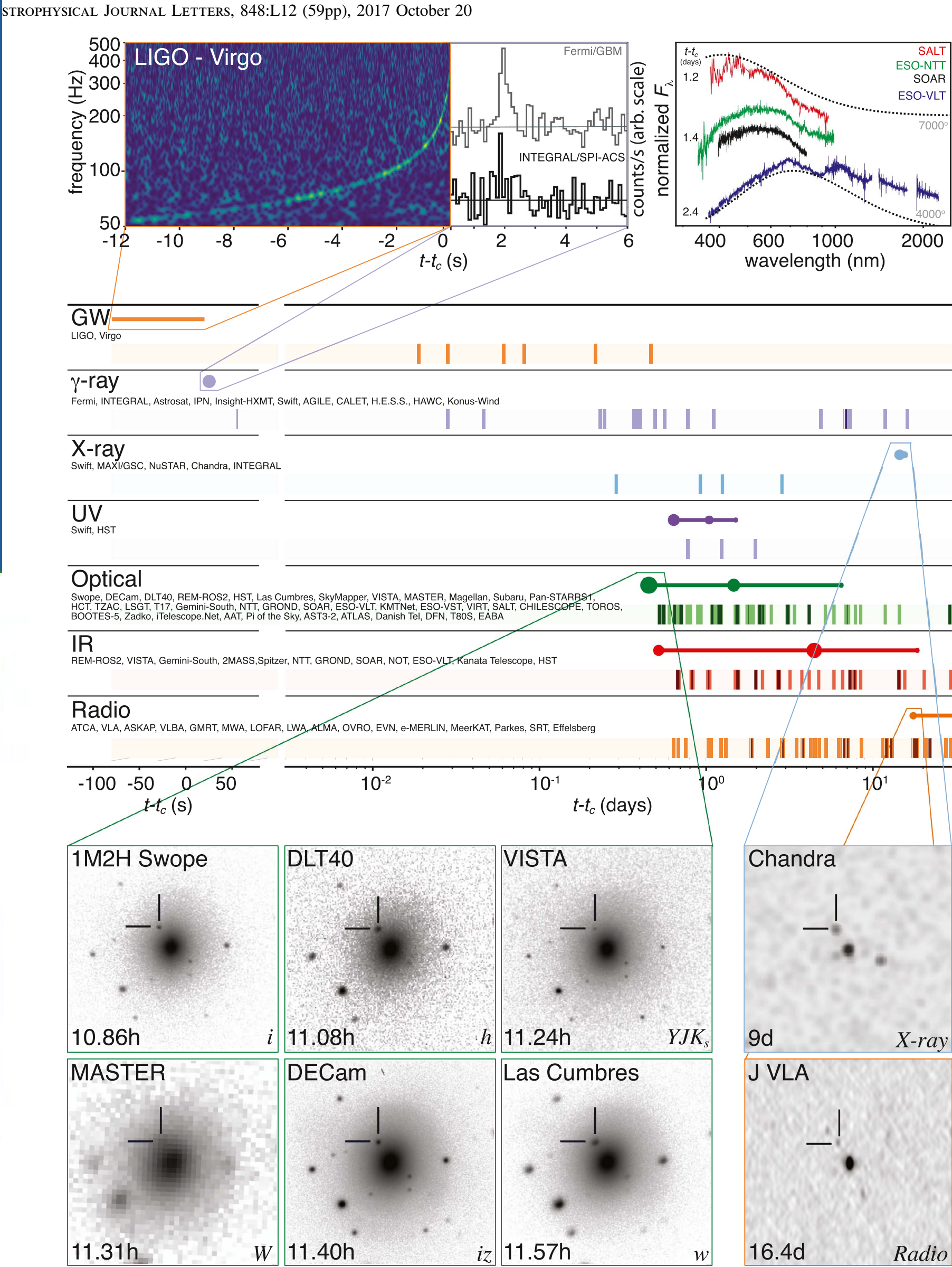
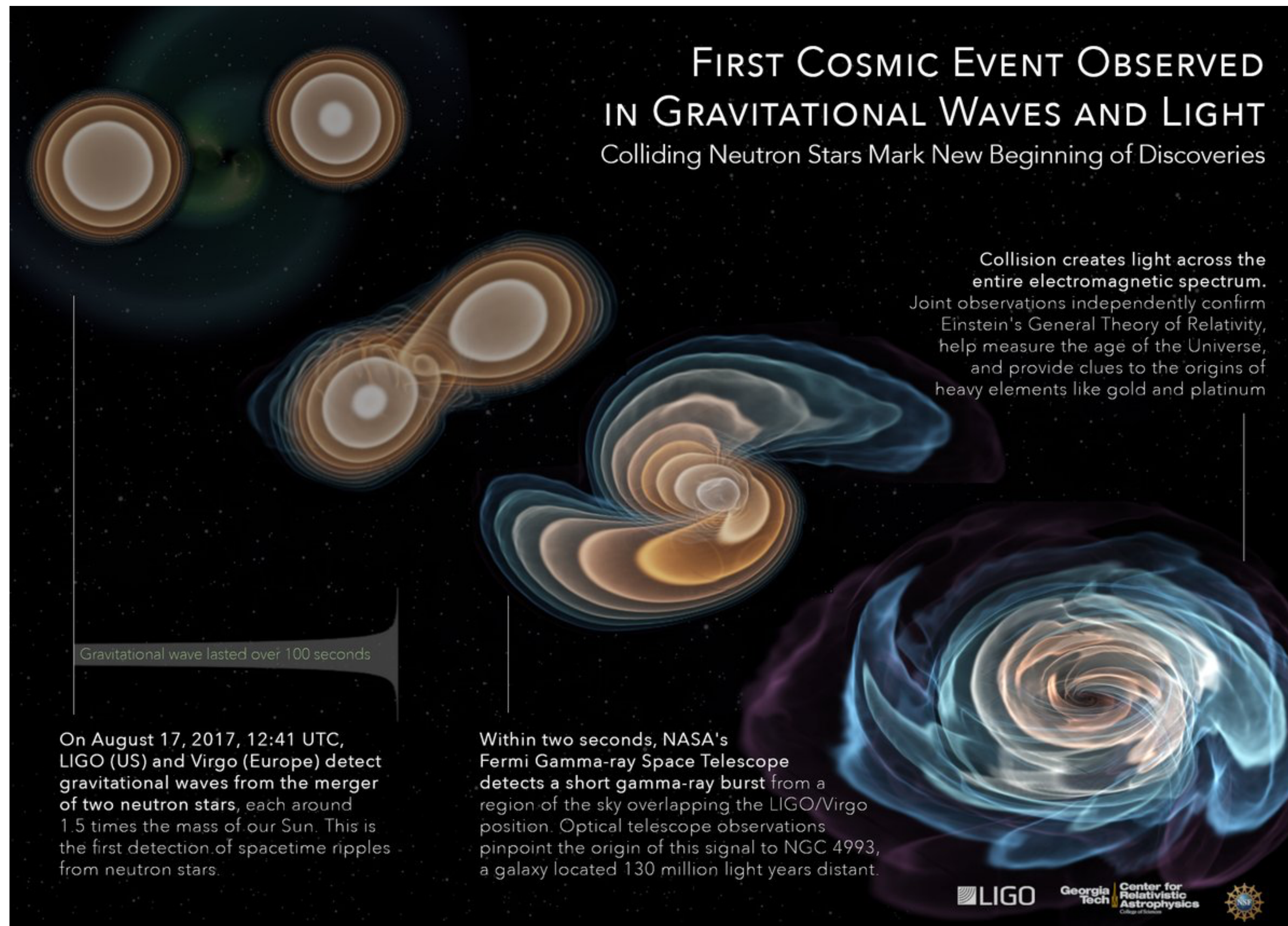


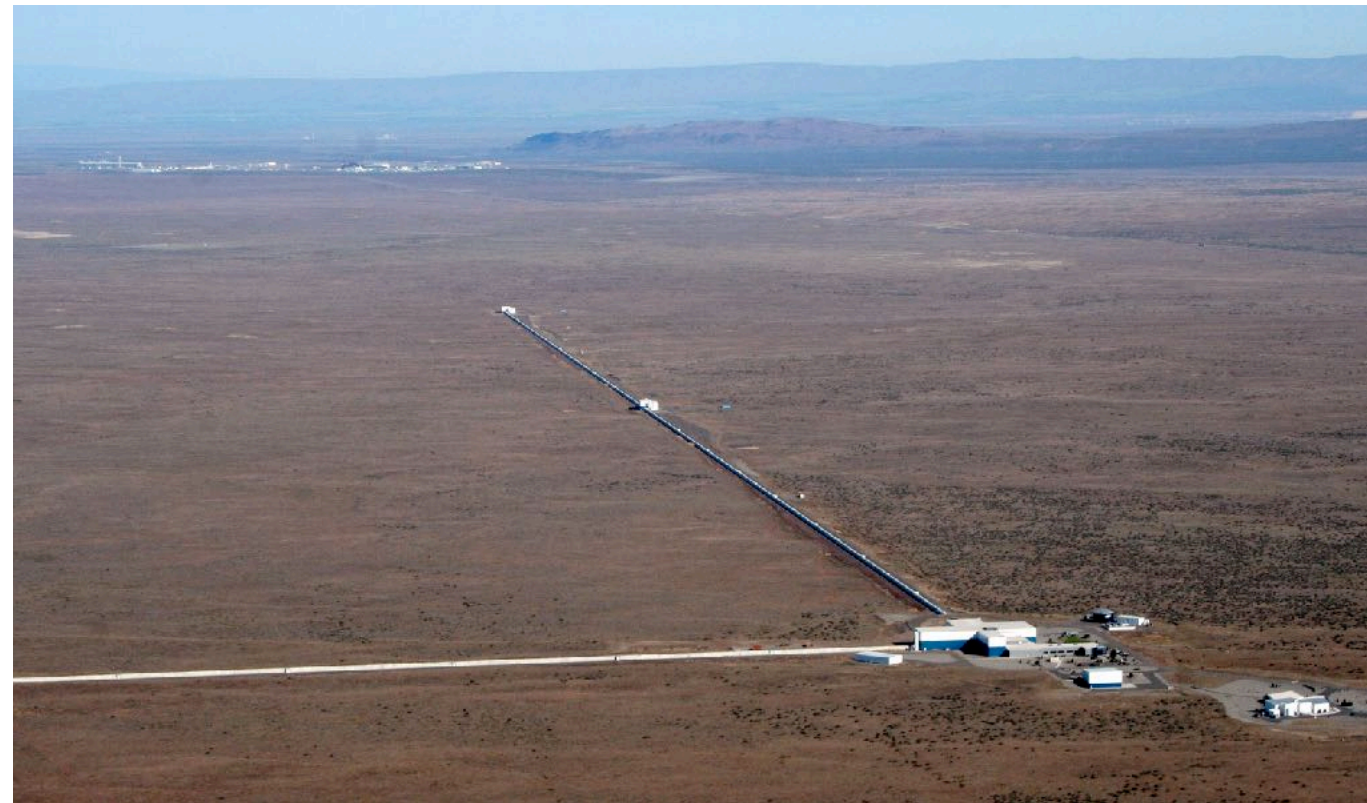
Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent 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



2023年5月から 日米欧で重力波共同観測中

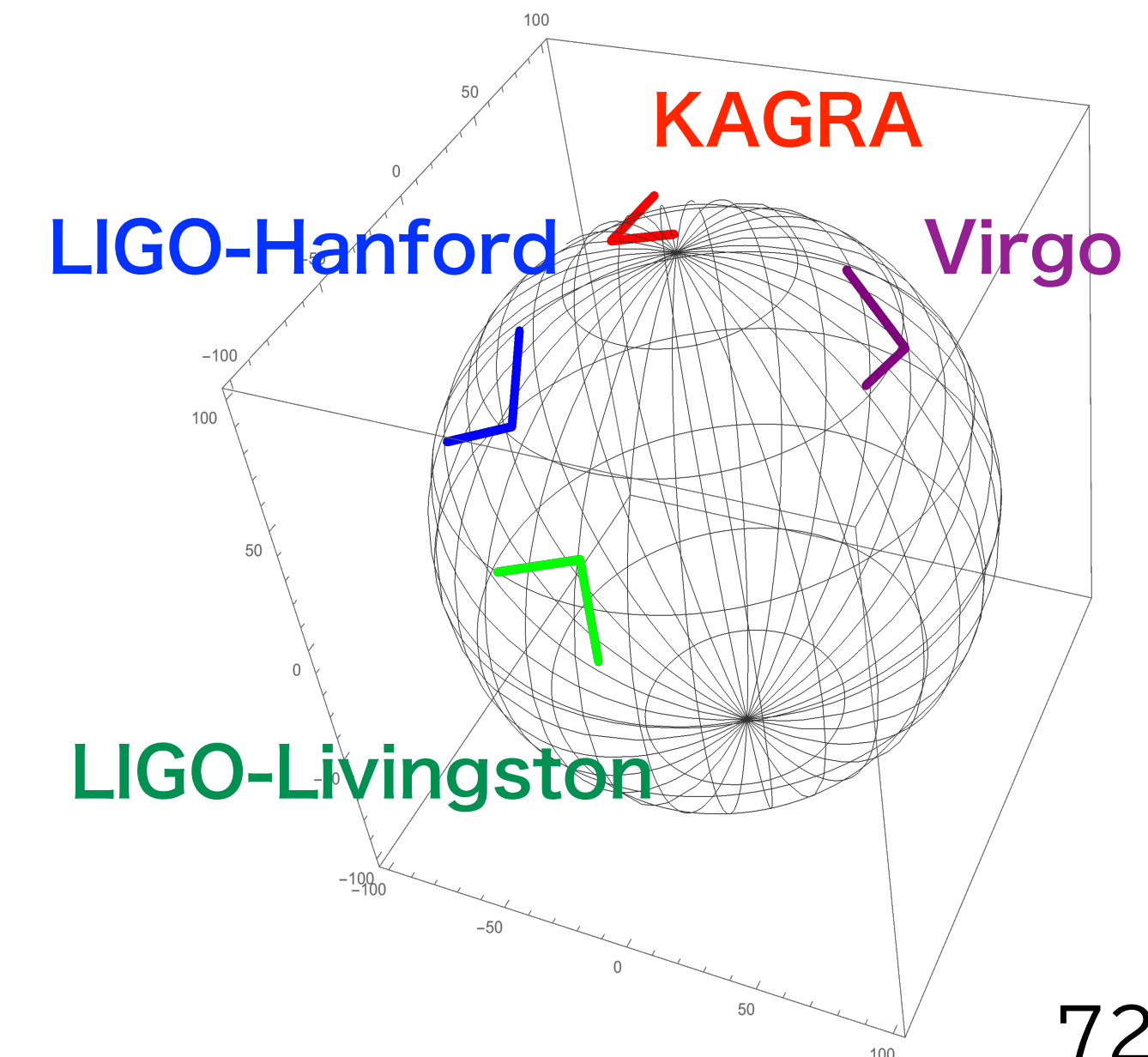
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



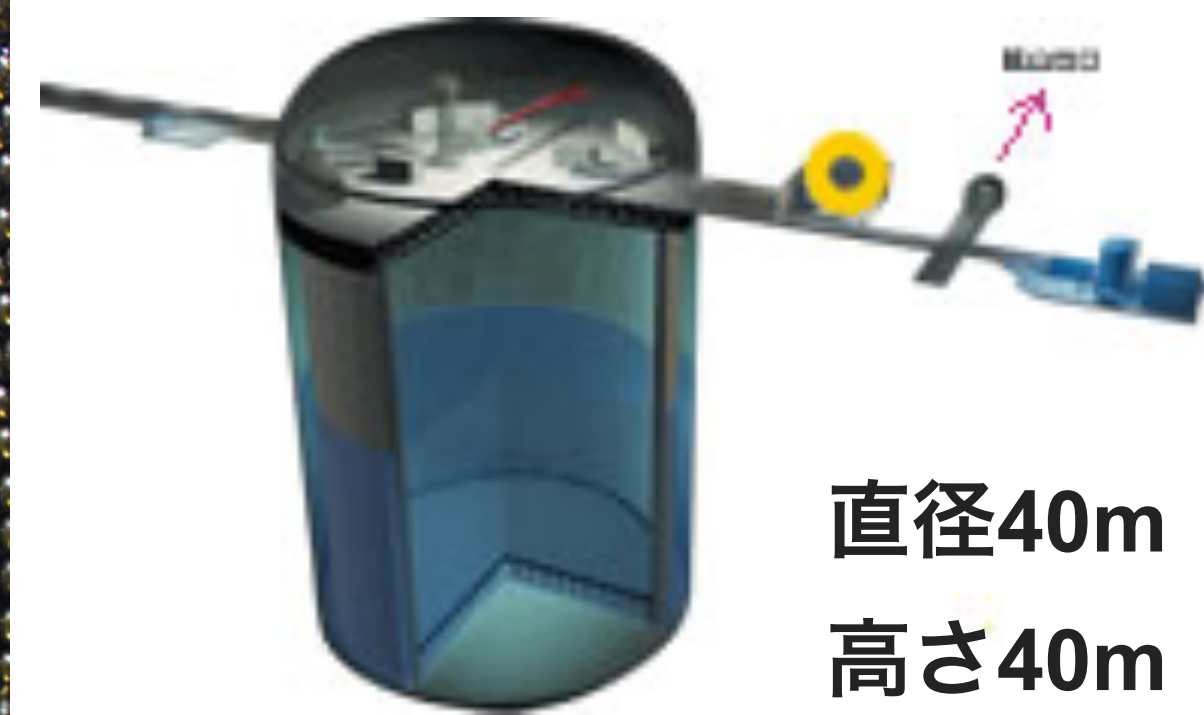
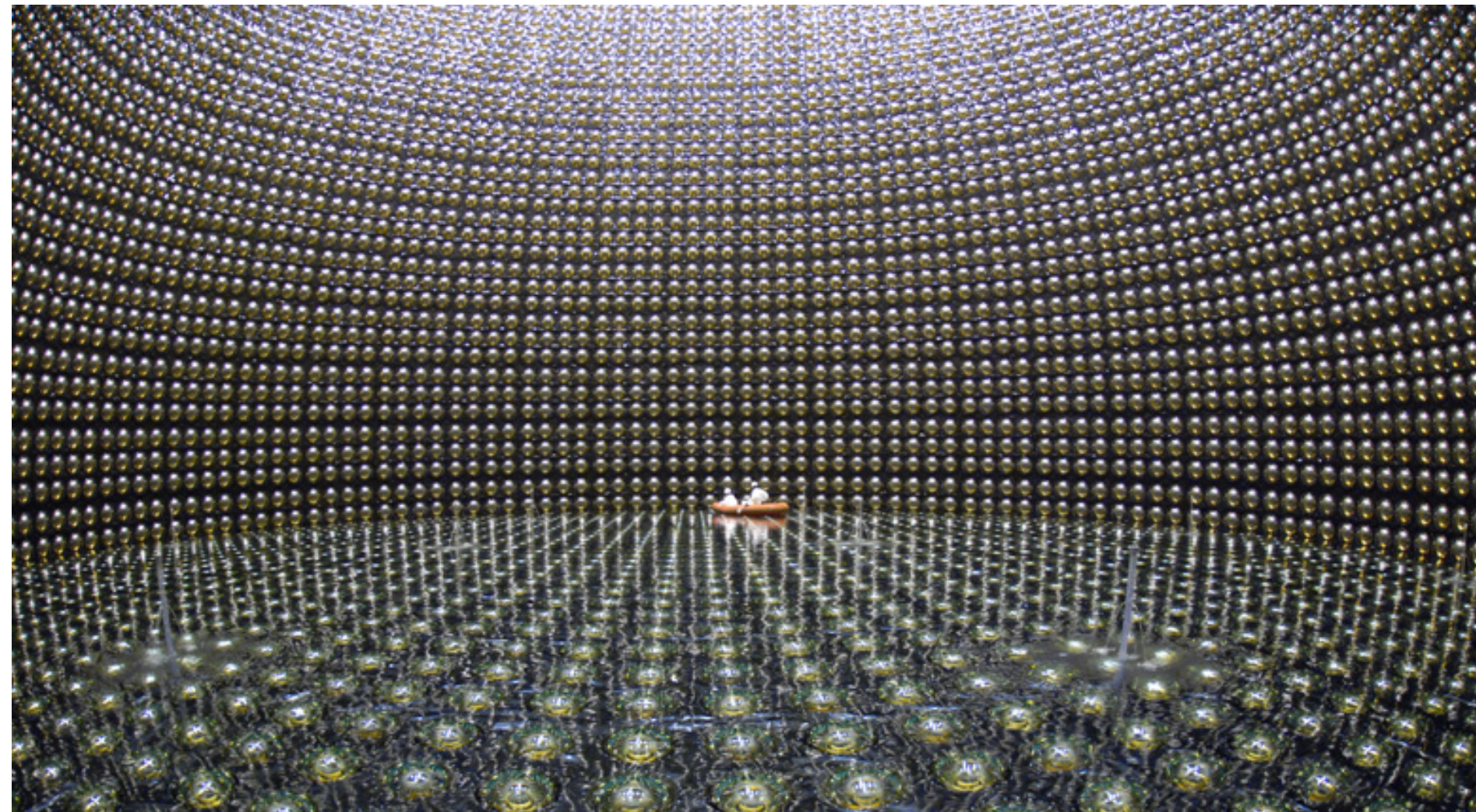
日本・KAGRA(岐阜・神岡)



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)

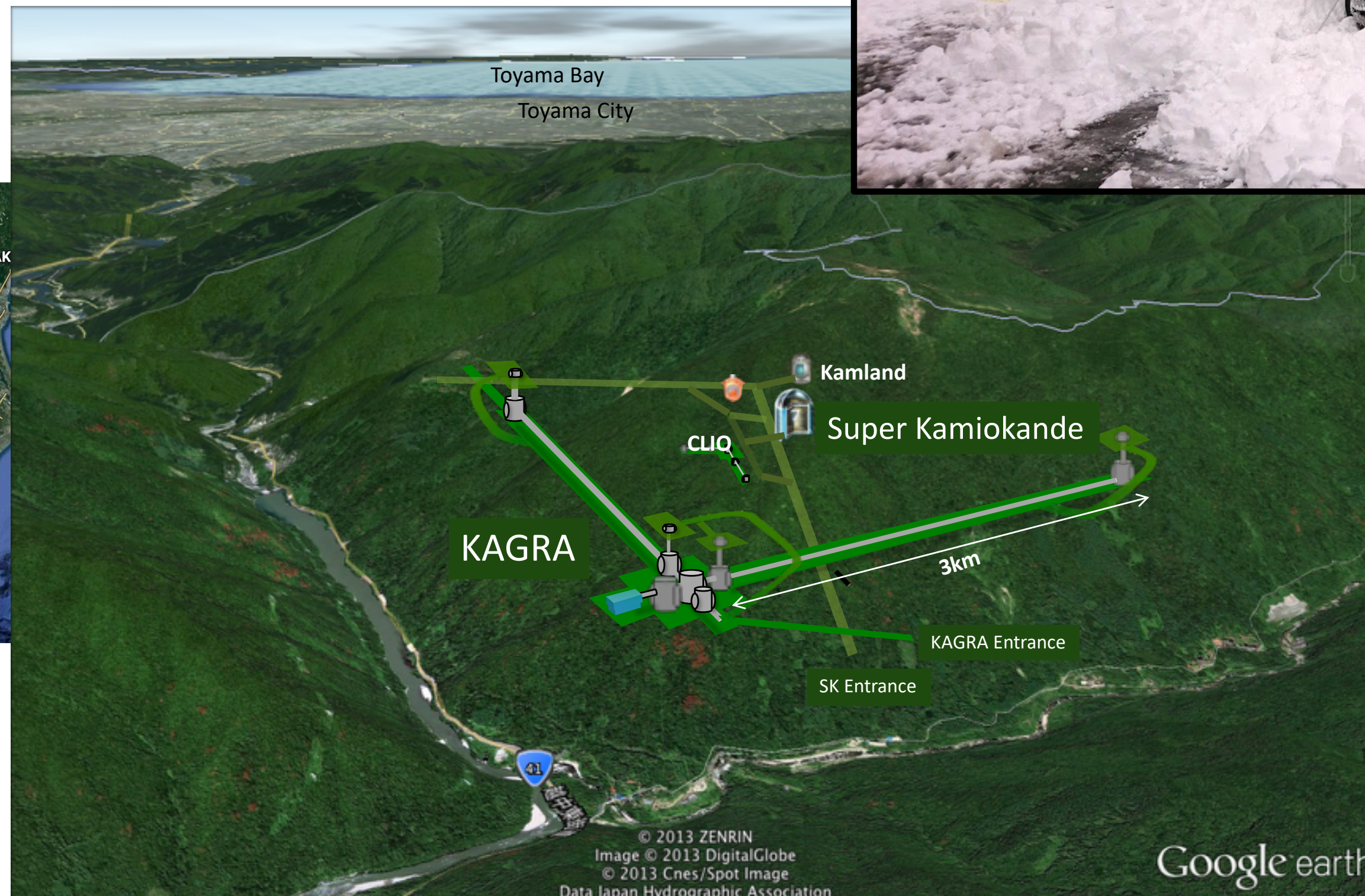


KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



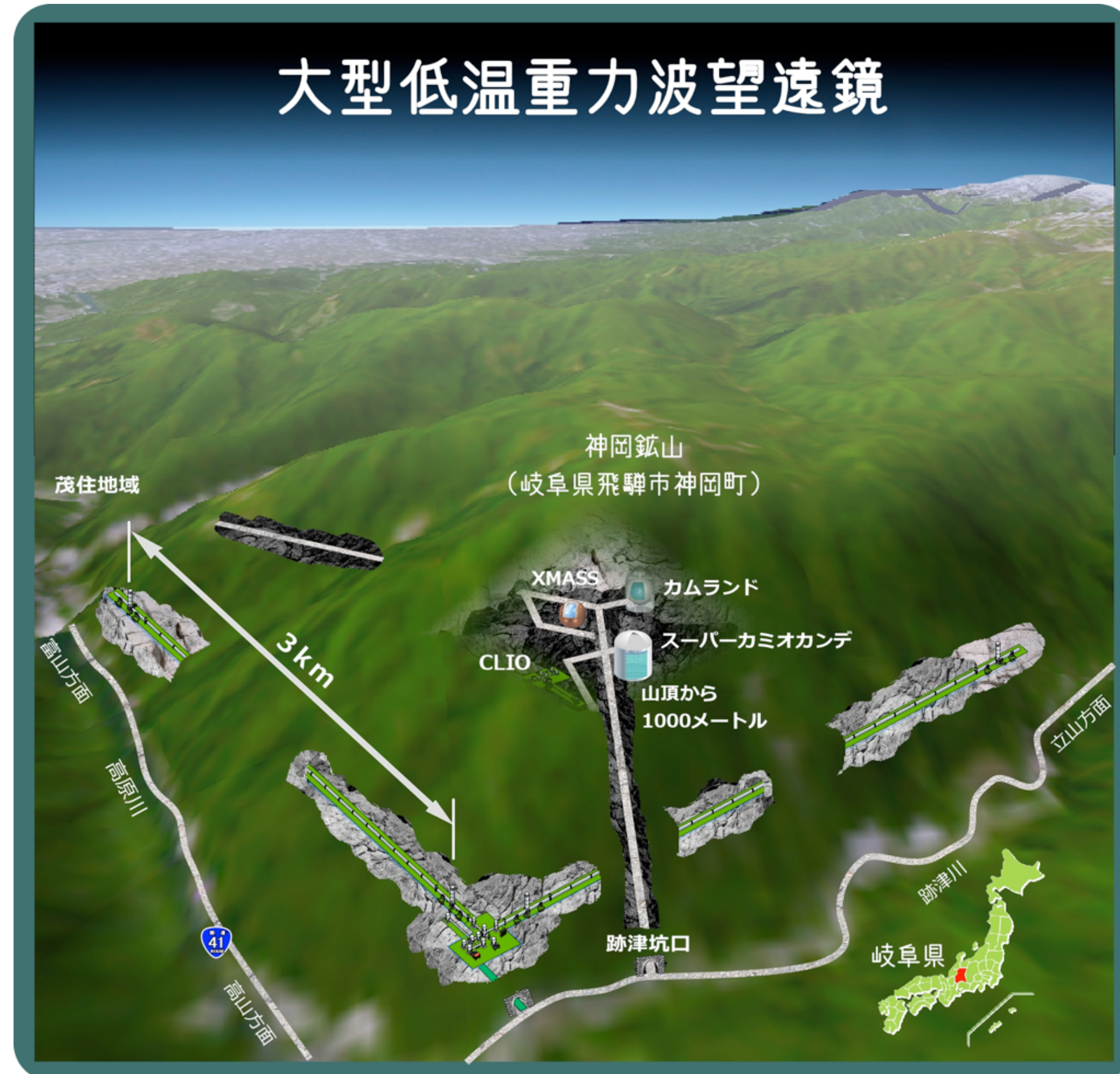
KAGRA (Kamioka GW Observatory)

◆ **Underground** and **Cryogenic** interferometric gravitational-wave detector at Kamioka, Japan



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

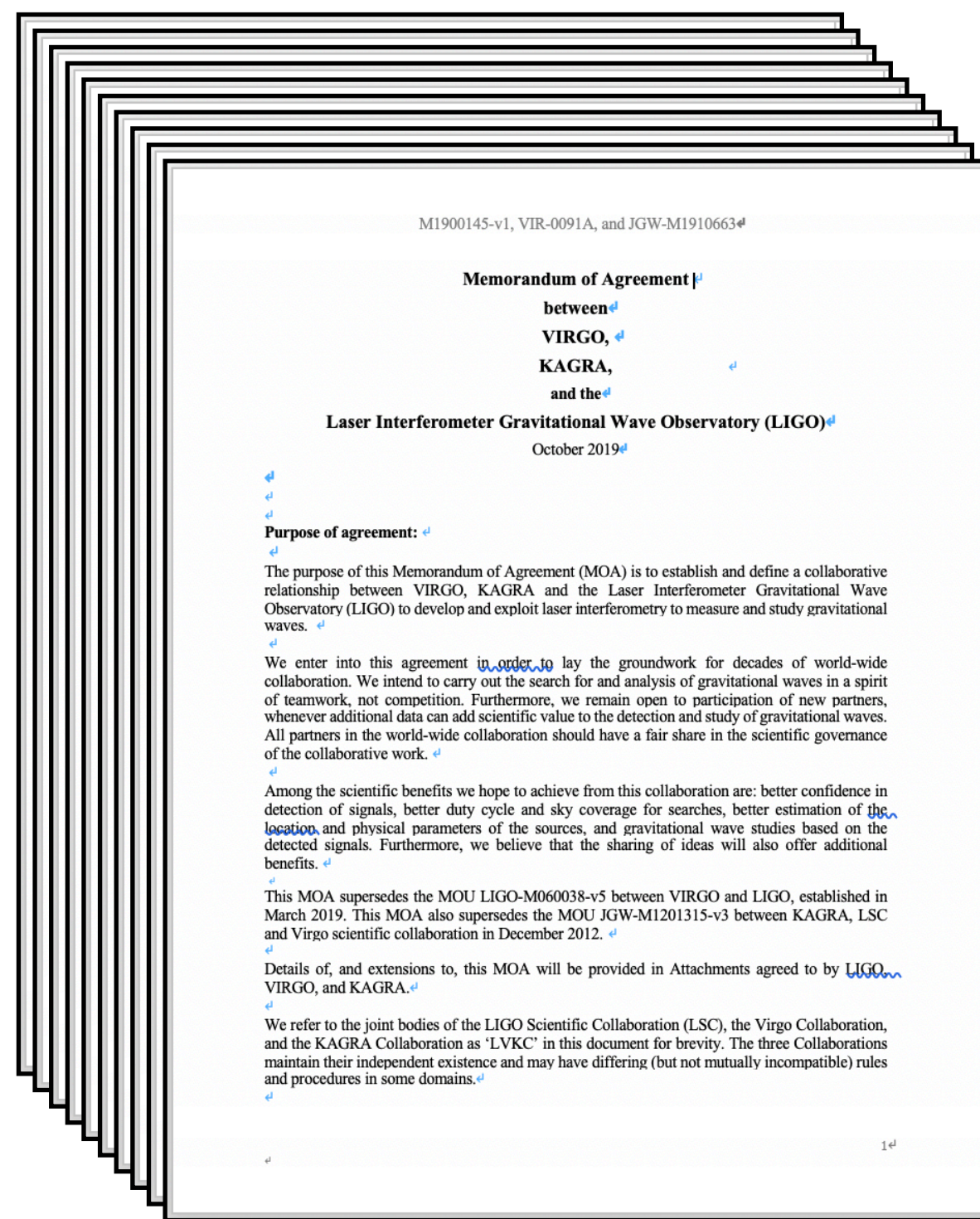
熱雑音を小さくするため

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>

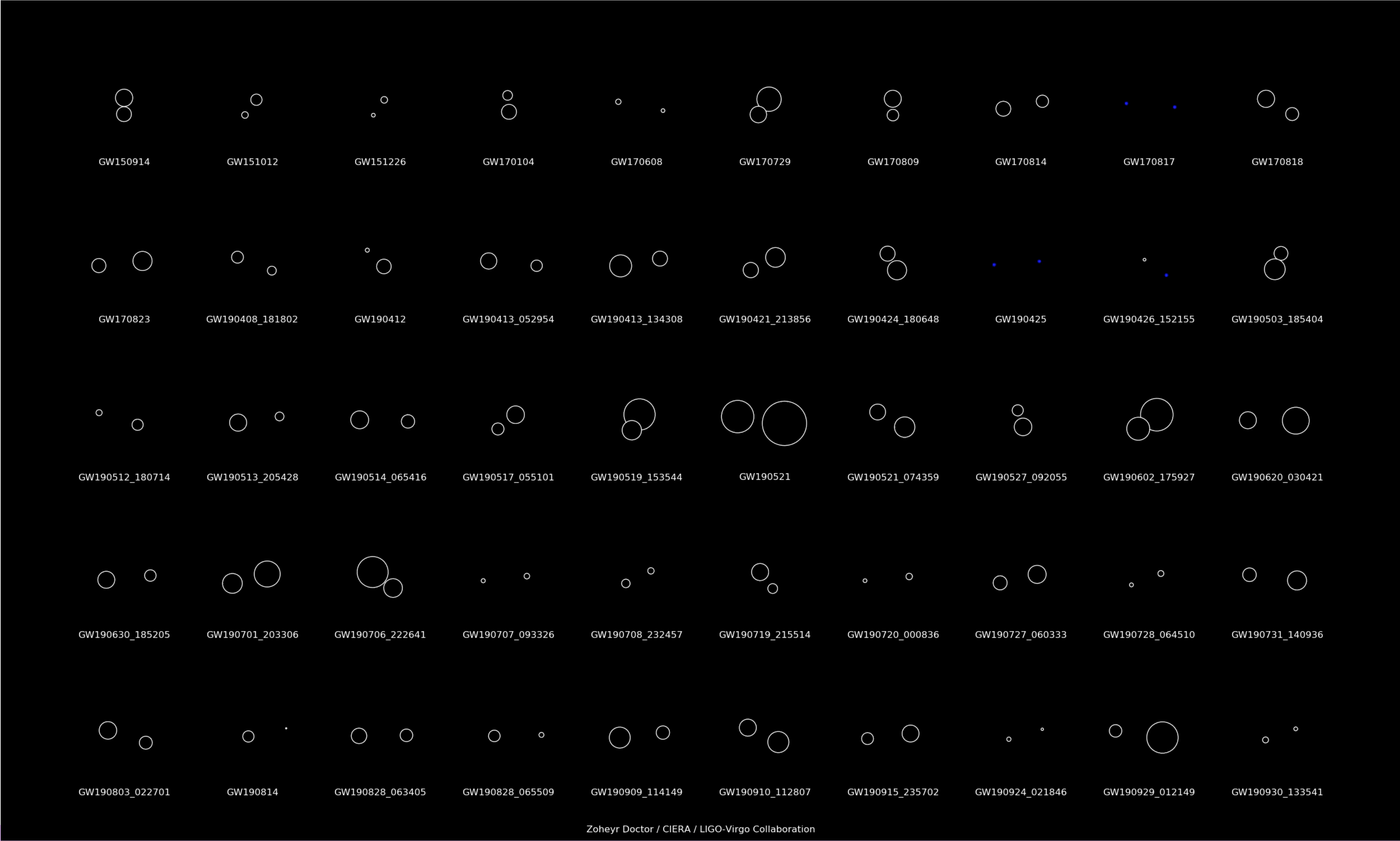
KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



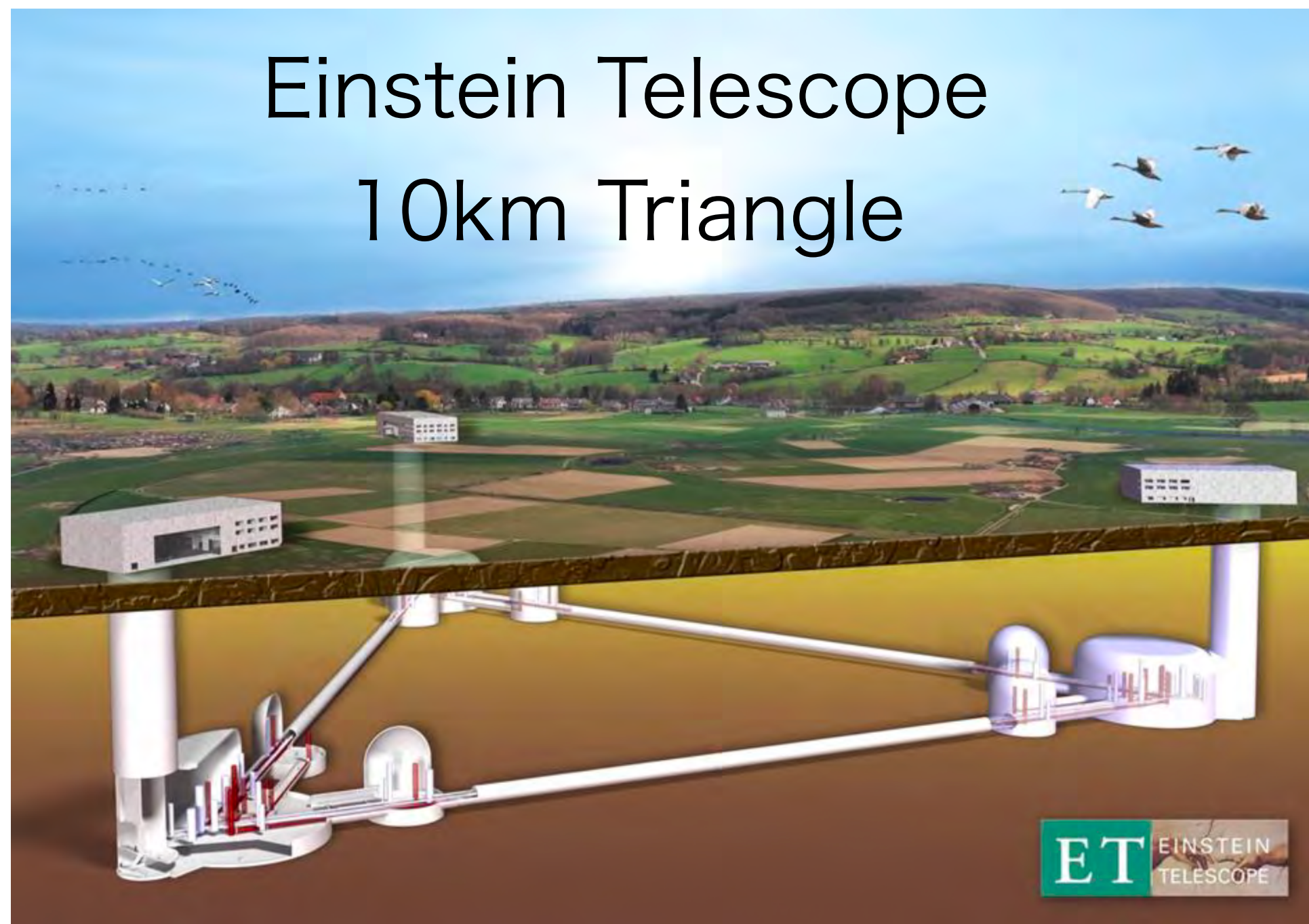
2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

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

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



重力波観測装置(地上)の将来計画



◀ ヨーロッパの計画

予算承認

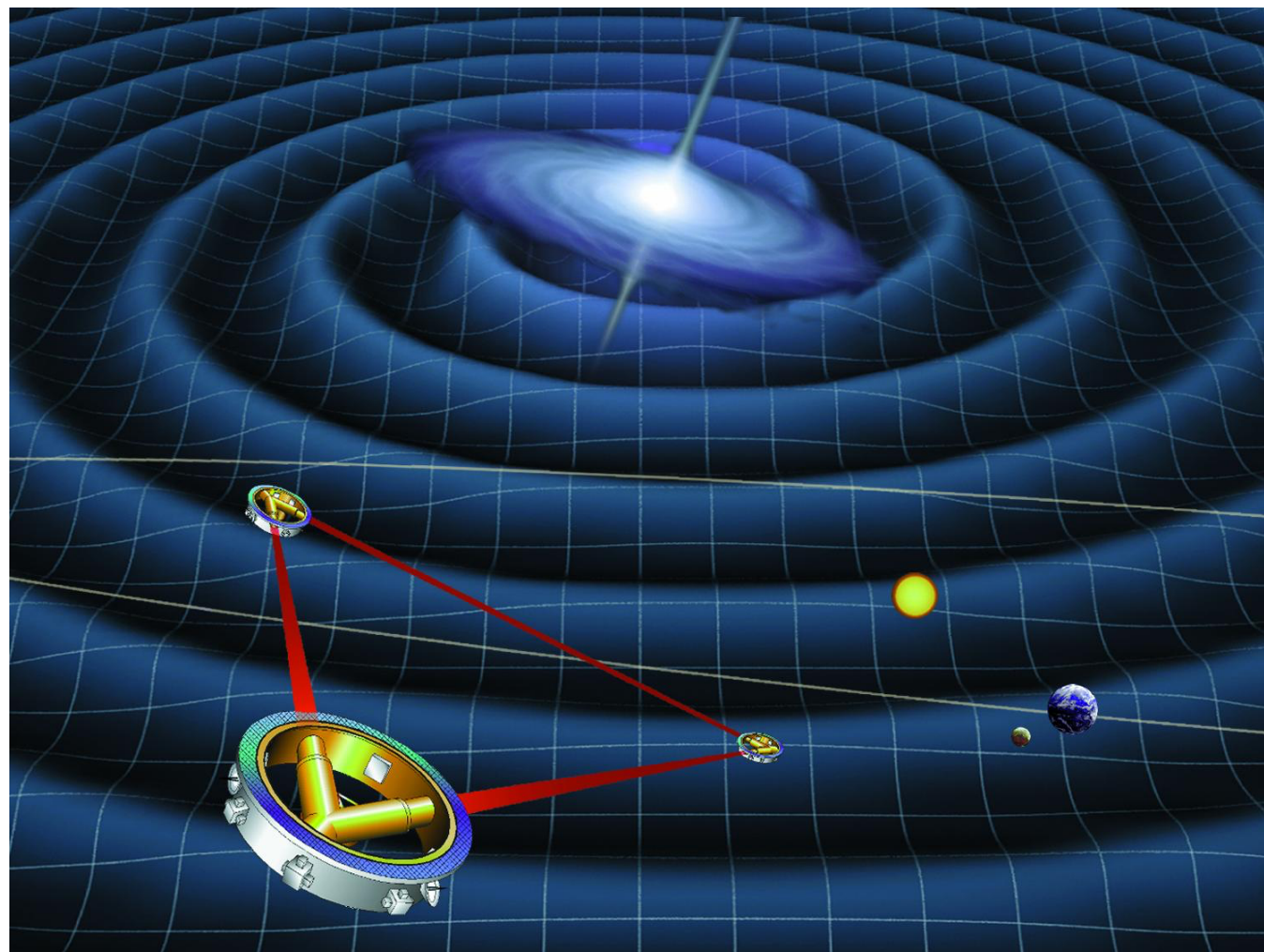
建設地未定(候補地2つ)

アメリカの計画 ▶

予算申請準備



重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



◀ ヨーロッパの計画

予算承認

2034年頃打ち上げ, 3年間稼働

250万kmの腕の長さ

地球の公転軌道のL4

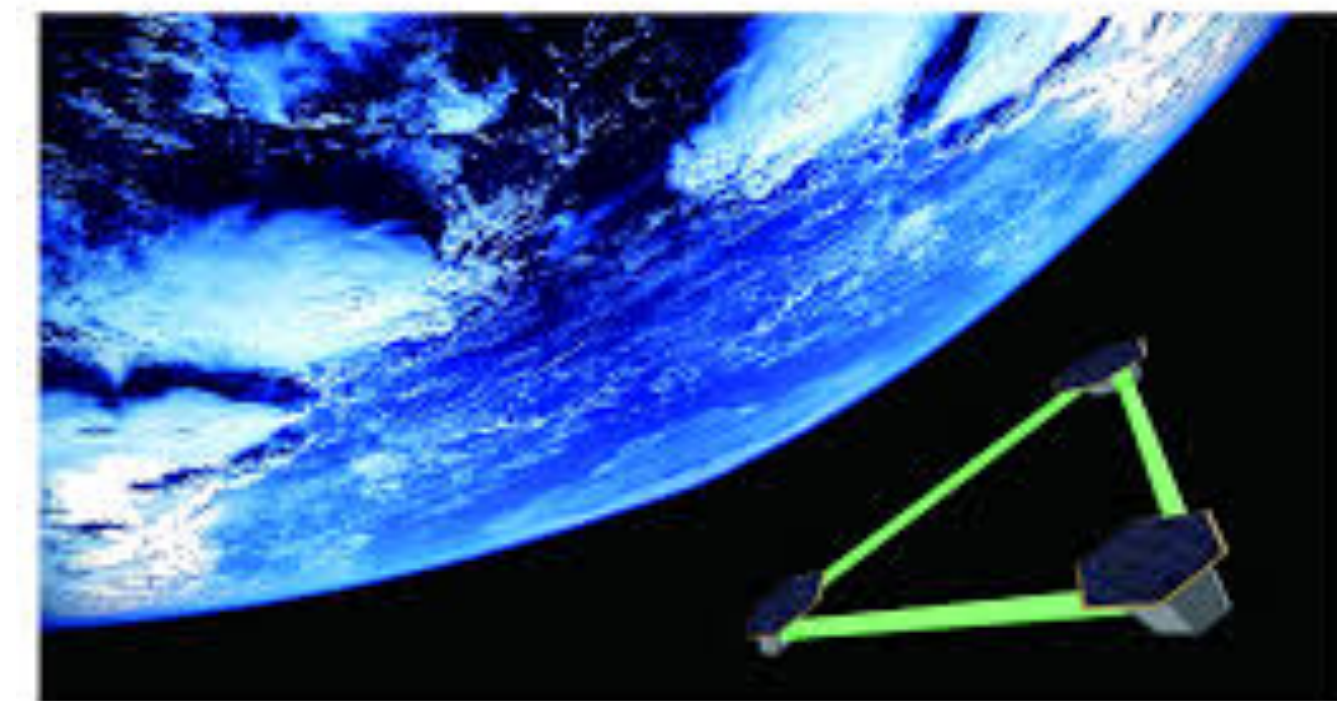
低周波数帯(mHzからHz帯)

日本の計画 ▶

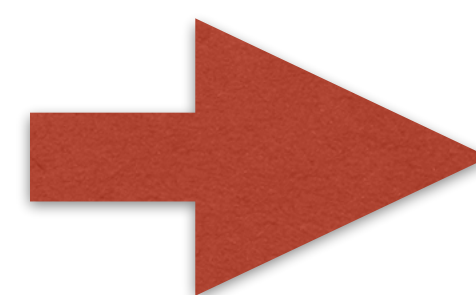
予算申請準備

1000kmの腕の長さ

低周波数帯(decihzからHz帯)



宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大BH形成過程がわかる
宇宙の膨張速度がわかる

重力波

時空のゆがみ（トランポリンのゆれ）が伝わる

⇒ 小さな小さな波をとらえることができた！

衝突したときの音を聴くことができた！

重力波天文学で何がわかる？

⇒ どういうブラックホールか

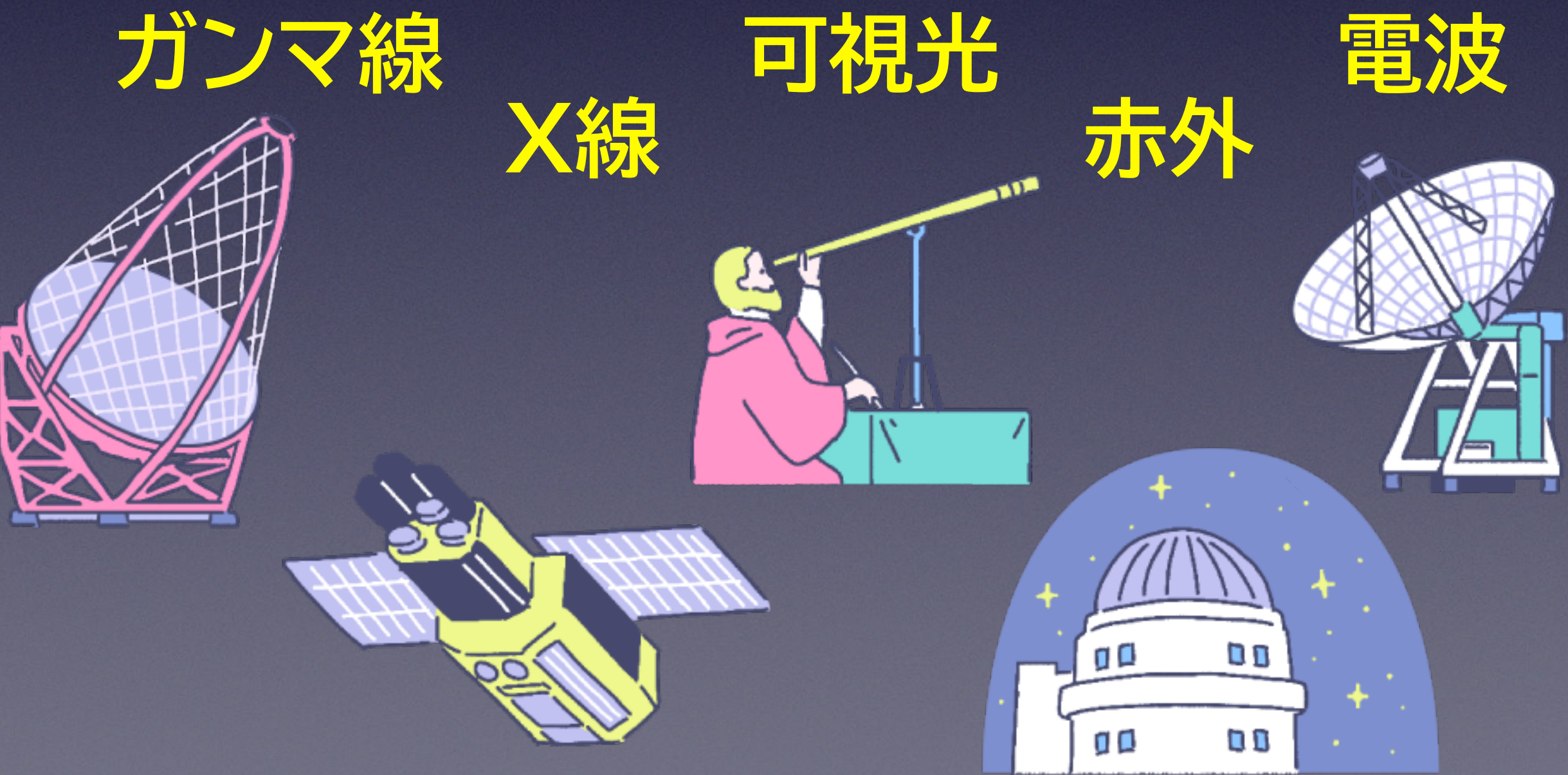
⇒ 銀河系がどうできてきたのか

⇒ 宇宙のはじまりはどうなっていたのか

⇒ アインシュタインは正しかったのか

マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

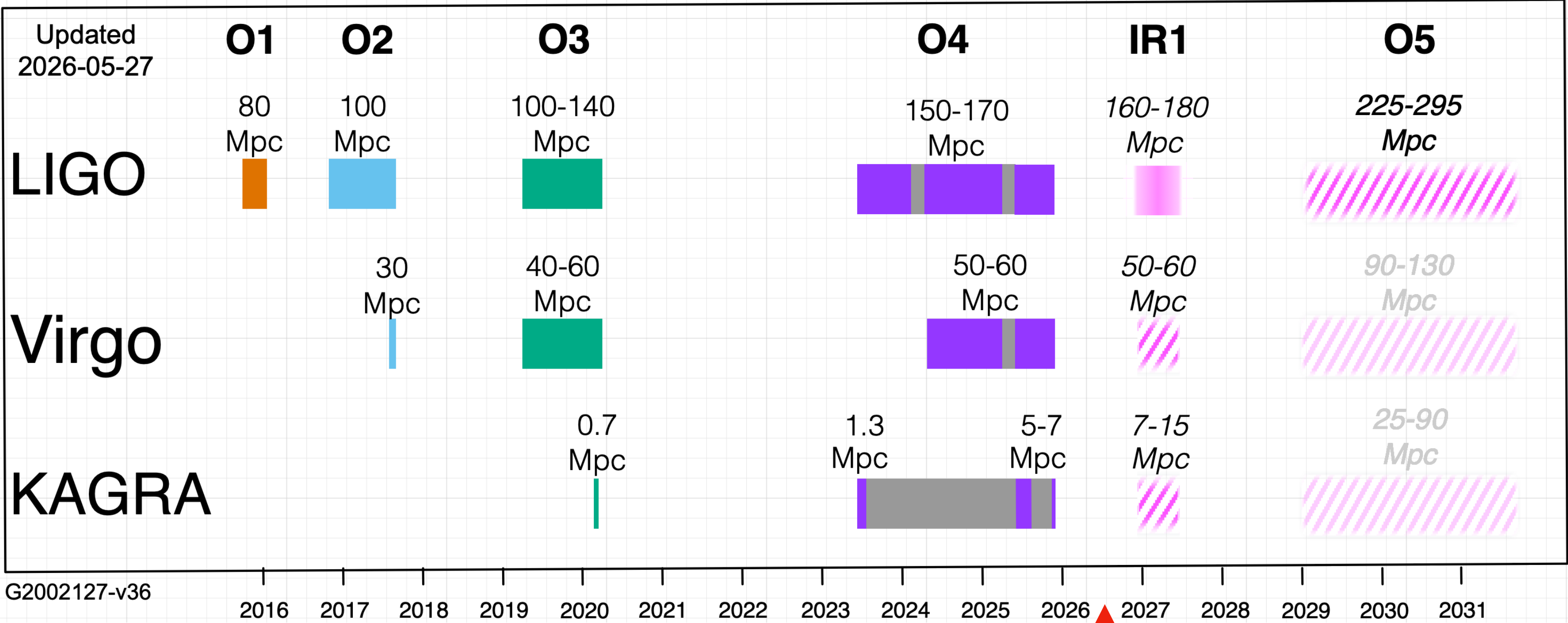
													
	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波						
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波	
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4		
波長[nm]				380	770								
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4	
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レ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



Mpc means the observable distance of the typical NSNS mergers



O4a
O4b
O4c
↑
today

観測期間 (Observing Run) 日付は UTC 表示

観測期	Advanced LIGO		Advanced Virgo		KAGRA	
	年	月 日	年	月 日	年	月 日
O1	2015	9 12	–2016	1 19	–	–
O2	2016	11 30	–2017	8 25	–	–
O3a	2019	4 1	–2019	9 30	同左	–
O3b	2019	11 1	–2020	3 27	同左	(O3GK) 2020 4 7 –2020 4 21
O4a	2023	5 24	–2024	1 16	–	2023 5 26 –2023 6 25
O4b	2024	4 10	–2025	1 28	同左	–
O4c	2025	1 29	–2025	11 18	同左	2025 6 6 –2025 11 18

Catalog and Data Release



Event Catalog

The Gravitational-wave Transient Catalog (GWTC) is a cumulative set of events detected by LIGO, Virgo, and KAGRA.



Open Data Workshop

Participants will receive a crash-course in gravitational-wave data analysis that includes lectures, software tutorials, and a data challenge.



Tutorials

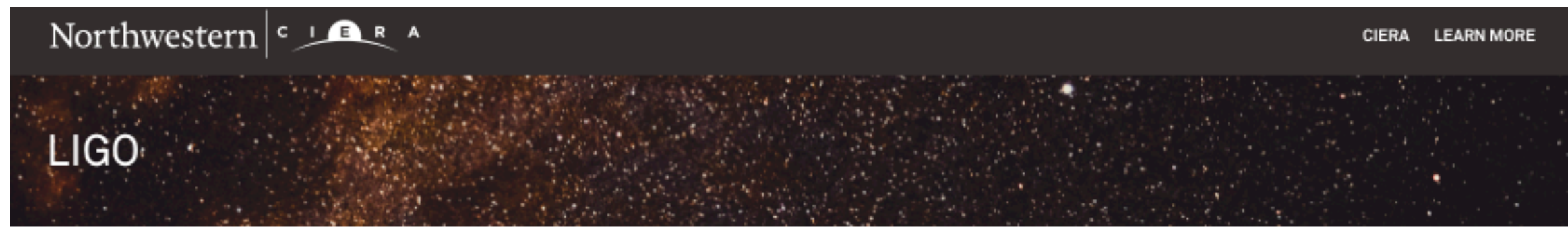
Learn with tutorials that will lead you step-by-step through some common data analysis tasks.

<https://gwosc.org/>

GW Transient Catalog

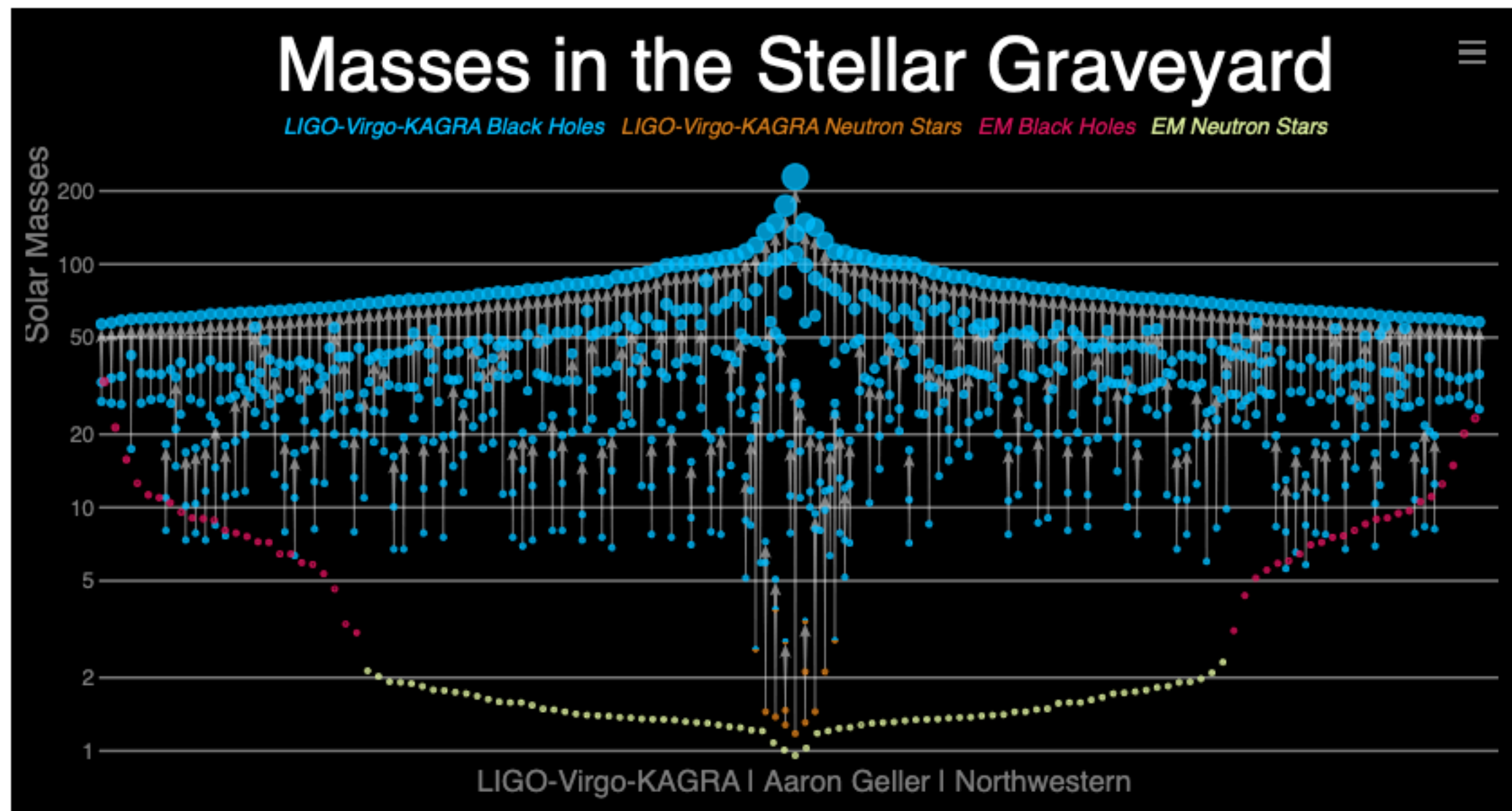
		released	arXiv	ref.	BHBH	NSNS	NSBH	unknown	total
GWTC-1	O1+O2	2018/Dec 3	1811.12907	PRX 9 (2019) 031040	10	1			11
GWTC-2	O3a	2020/Oct 28	2010.14527	PRX 11 (2011) 021053	36	1		2	39
GWTC-2.1	+	2021/Aug 2	2108.01045		+8-3				5
GWTC-3	O3b	2021/Nov 5	2111.03606	PRX 13 (2023) 041039	32		3		35
GWTC-4	O4a	2025/Aug 25	2508.18082		86				86
GWTC-5	O4b	2026/May 26	2605.27225		104				104
				total	268	2	3	2	280

Tools to learn Gravitational Wave for geeks



Masses in the Stellar Graveyard

Supported Browsers:
Windows: Google Chrome
Mac: Google Chrome or Safari



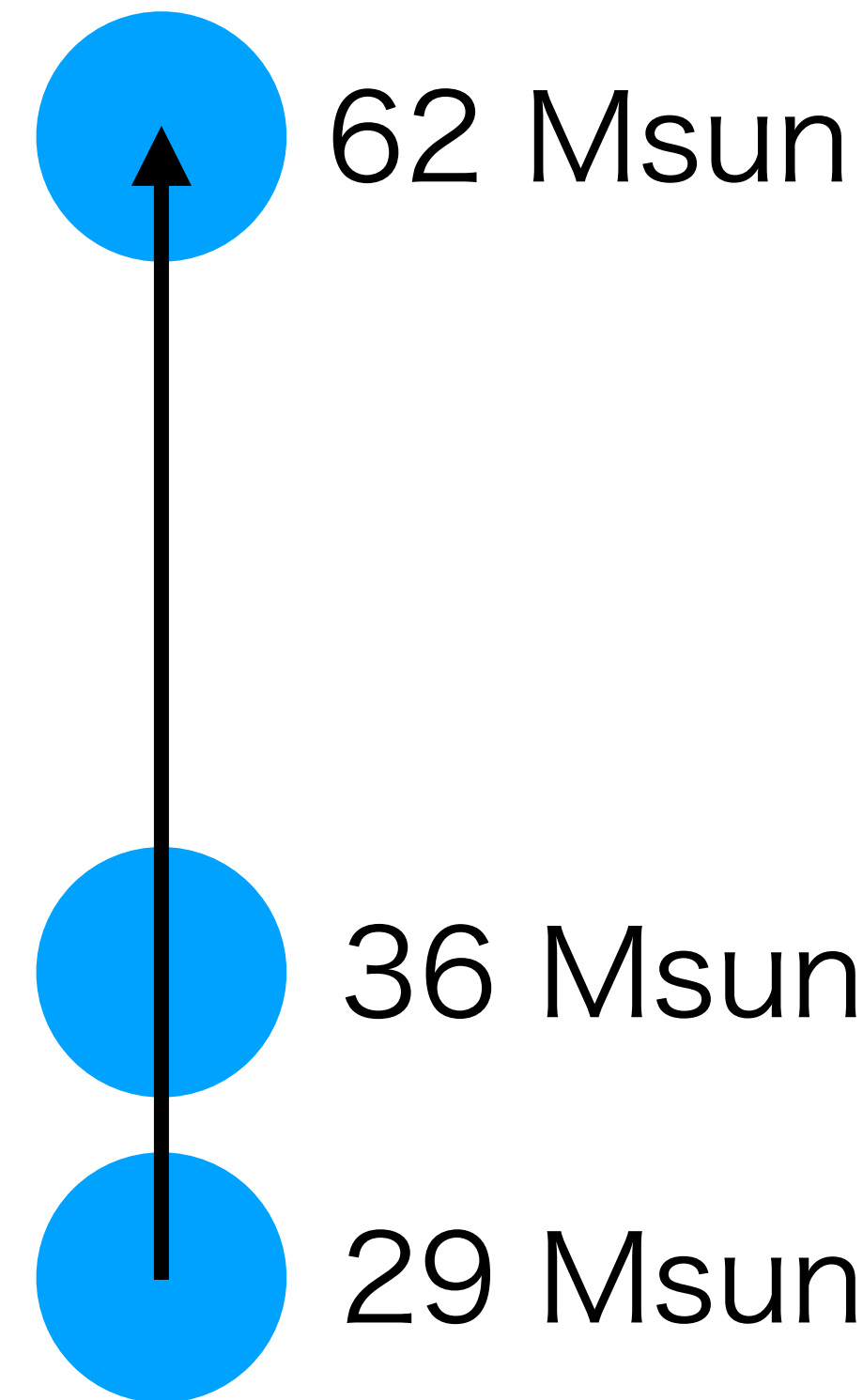
OPEN IN NEW WINDOW

Credit: Visualization: LIGO-Virgo-KAGRA / Aaron Geller / Northwestern

Visualization

BACK TO GALLERY

GW150914



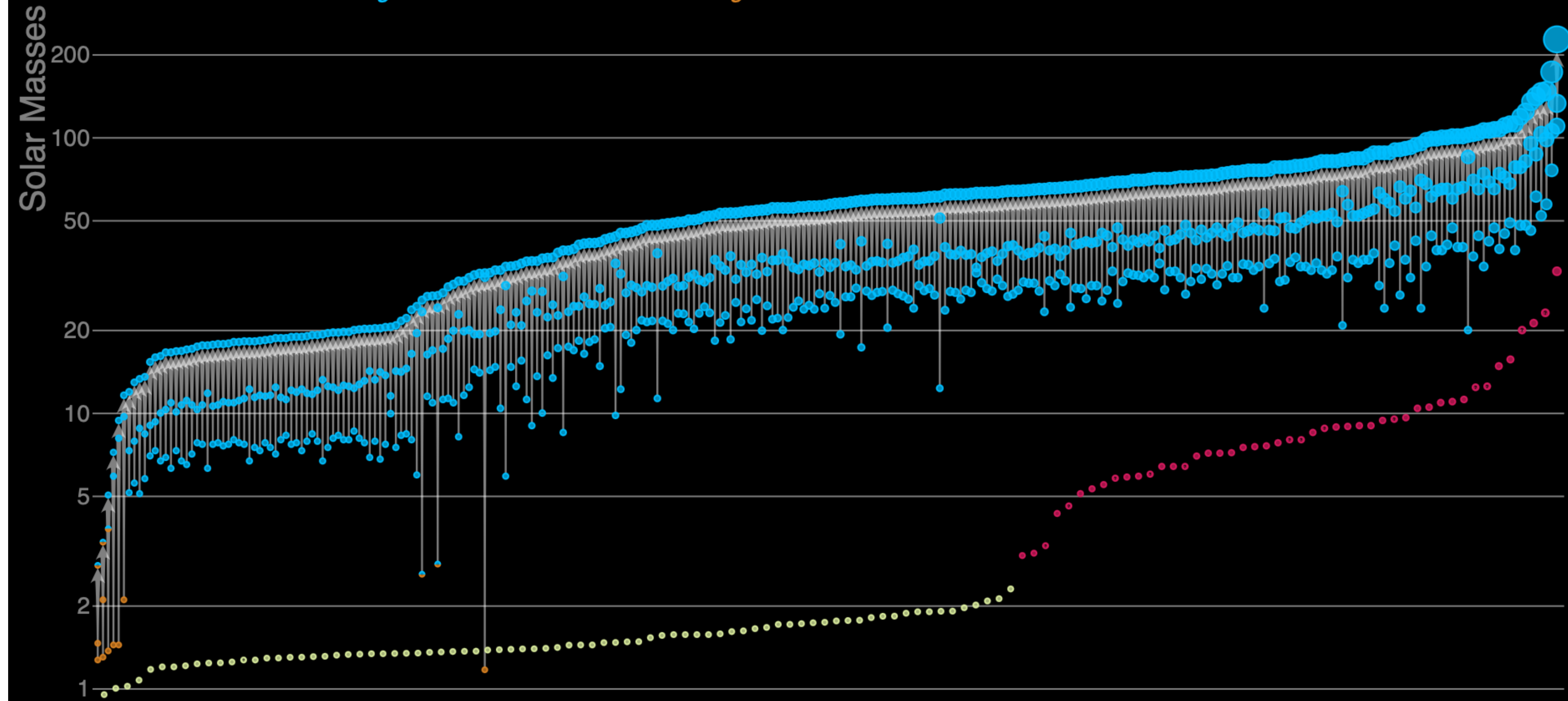
BH+BH $\rightarrow$ BH
29+36 $\rightarrow$ 62 +3
GW

$$E = mc^2$$

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

Masses in the Stellar Graveyard

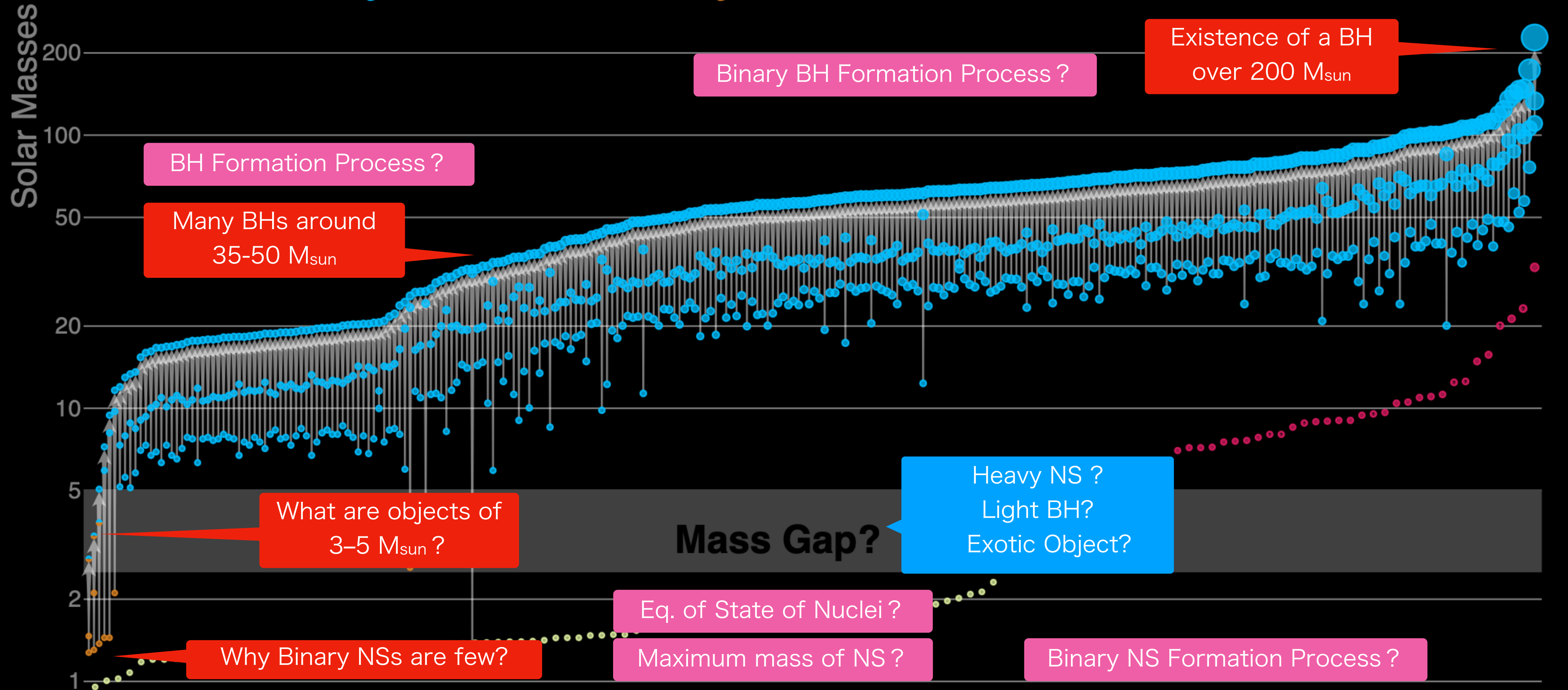
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



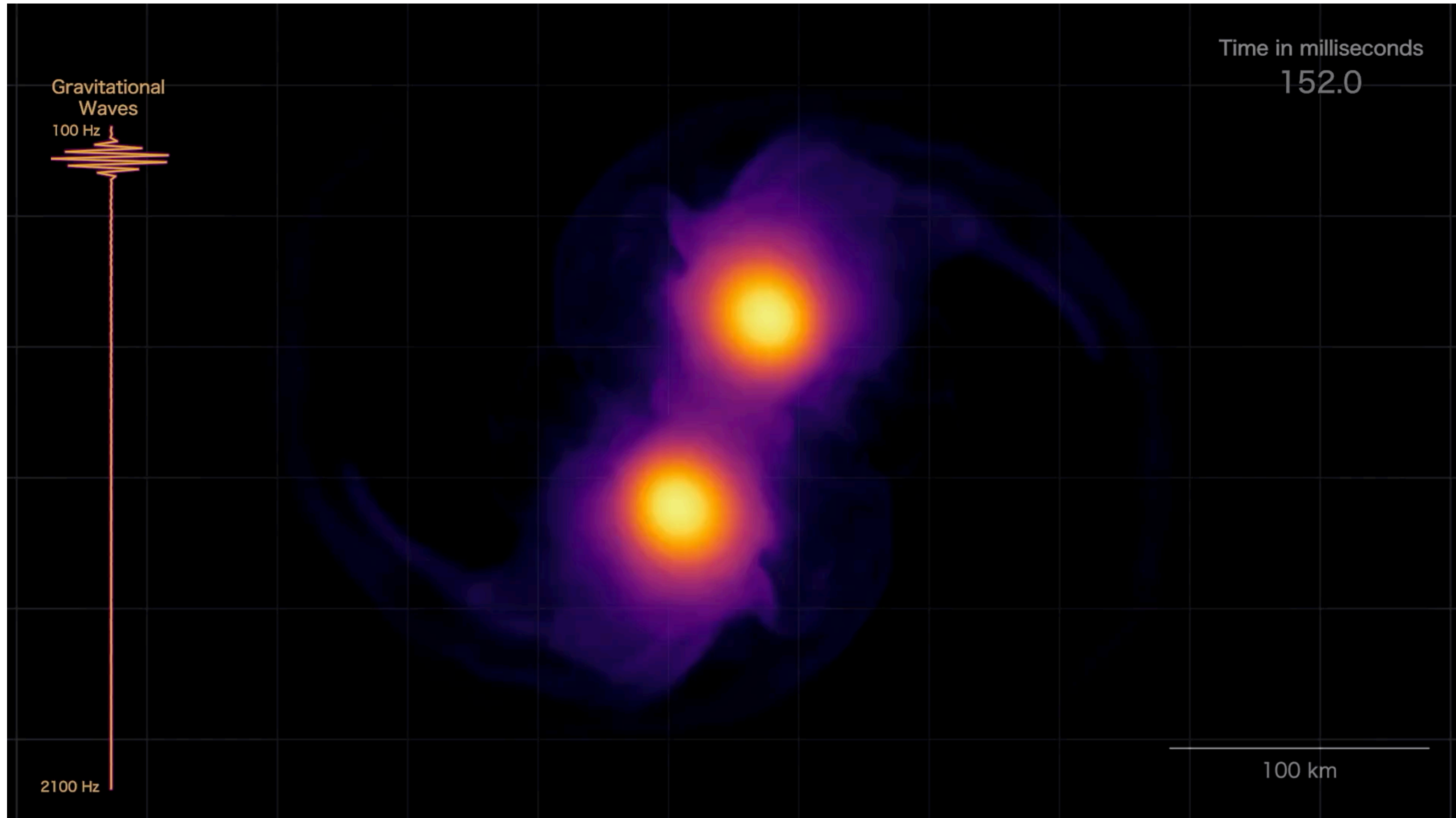
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



【物理】 Superheavy Neutron Star Merger's Audio Jumps Thousands Of Hertz In Simulation



See a pair of superheavy neutron stars collide in this simulation with gravitational wave audio. "An audible tone and a visual frequency scale (at left) track the steady rise in the frequency of gravitational waves as the neutron stars close," according to NASA's Goddard Spaceflight Center.

Credit: NASA's Goddard Space Flight Center and STAG Research Centre/Peter Hammond

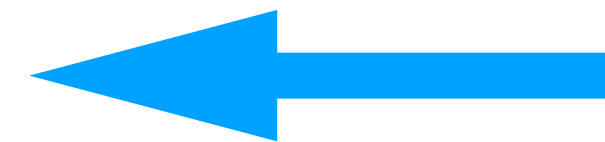
<https://www.dailymotion.com/video/x903e6y>

Science of S, Science of Y

physics_S 物理学
mathematics_S 数学
statistics_S 統計学
genetics_S 遺伝学

astronomy_Y 天文学
economy_Y 経済学
biology_Y 生物学
archaeology_Y 考古学
anthropology_Y 人類学
sociology_Y 社会学

Synthesize
Explain systematically



Discovery
Classify, Categorize

General Relativity



Black Hole
Expanding Universe
Gravitational Wave