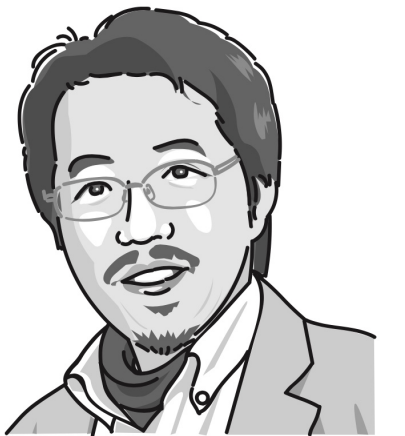


# 相対性理論の検証の歴史と重力波天文学

真貝寿明(しんかいひさあき)  
大阪工業大学情報科学部

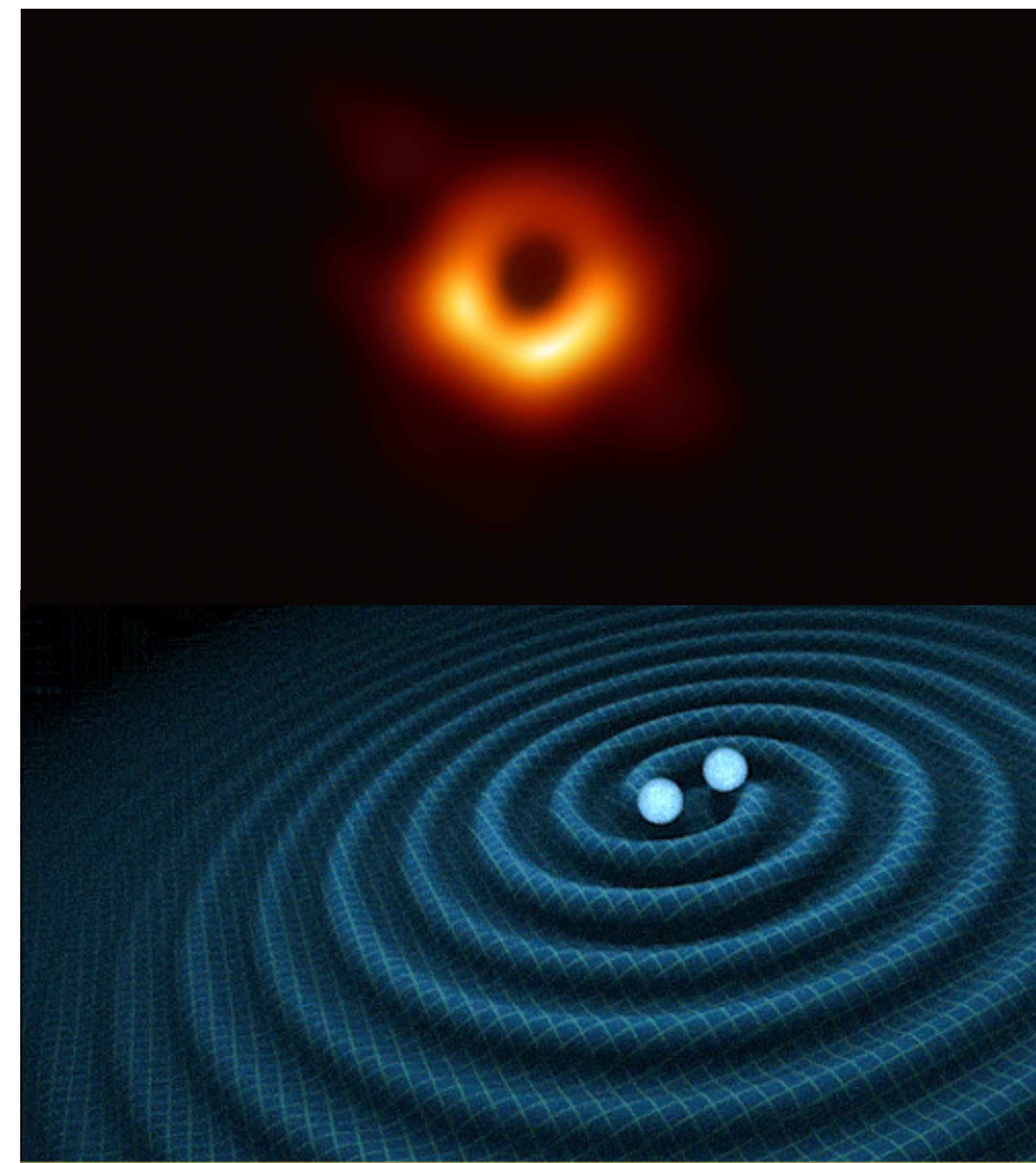


1. 相対性理論とは
2. ブラックホール
3. 相対性理論は正しいのか問題
4. 重力波

このスライドの取得先

[https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511\\_AsashiCulture.pdf](https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511_AsashiCulture.pdf)

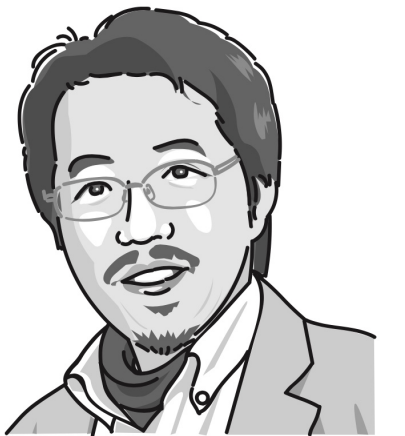
202511 朝日カルチャー slide





# 相対性理論の検証の歴史と重力波天文学

真貝寿明(しんかいひさあき)  
大阪工業大学情報科学部

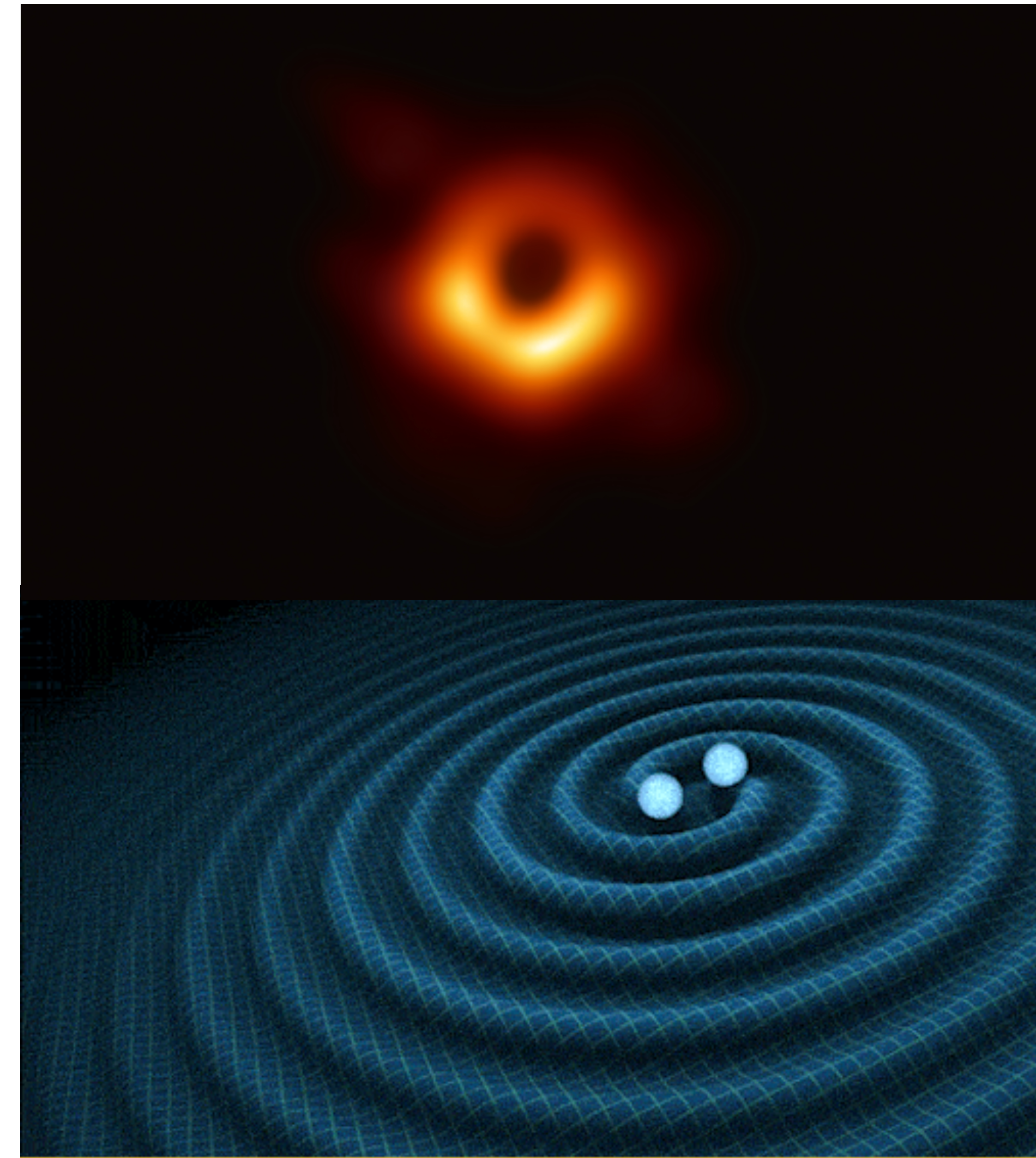


1. 相対性理論とは
2. ブラックホール
3. 相対性理論は正しいのか問題
4. 重力波

このスライドの取得先

[https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511\\_AsashiCulture.pdf](https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511_AsashiCulture.pdf)

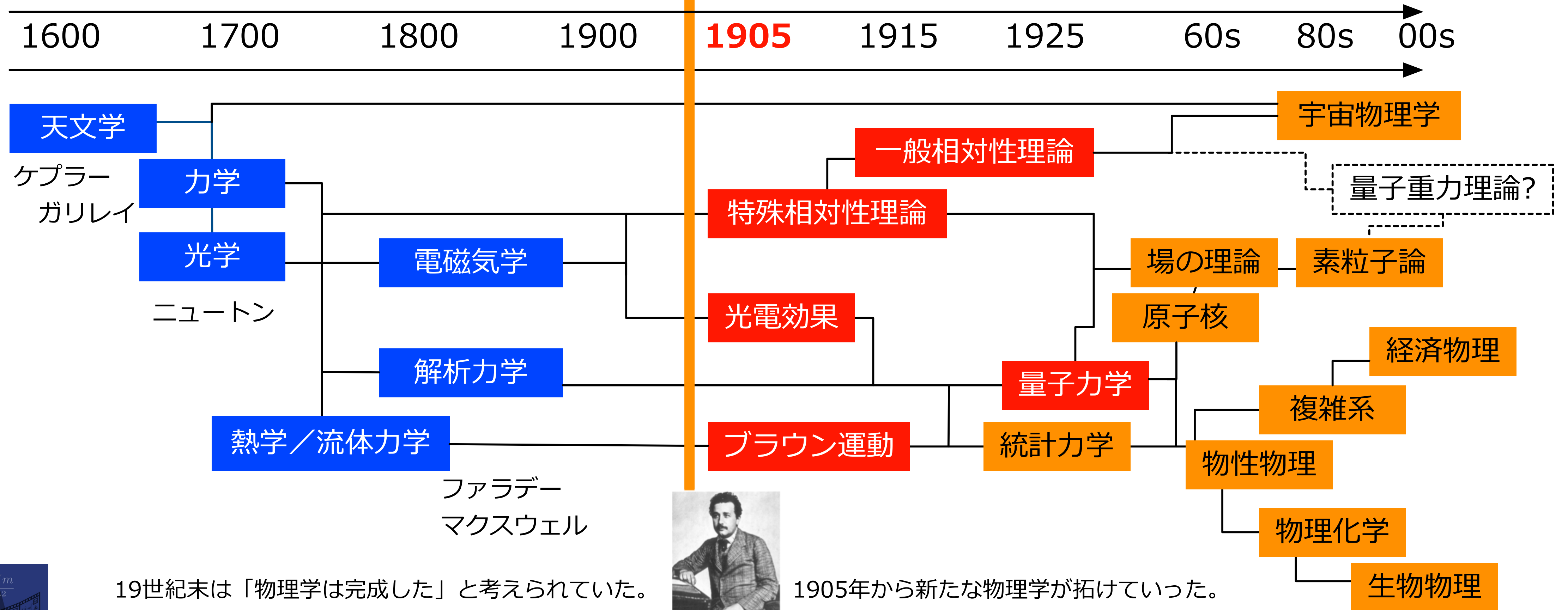
202511 朝日カルチャー slide





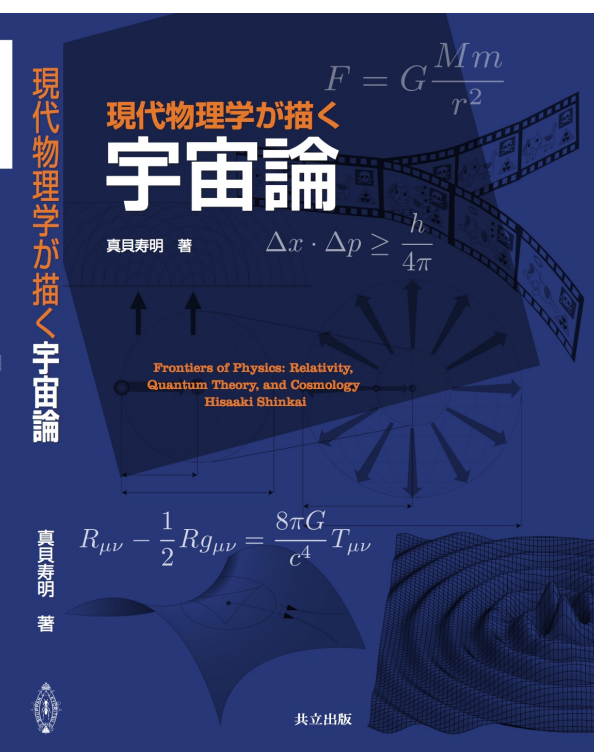
## 近代物理学の進展

## 現代物理学の進展



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

1905年から新たな物理学が拓けていった。





# 相対性理論 = 時間と空間の物理学

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」



ニュートン(1642-1717)

## ニュートン力学

$$F = ma$$

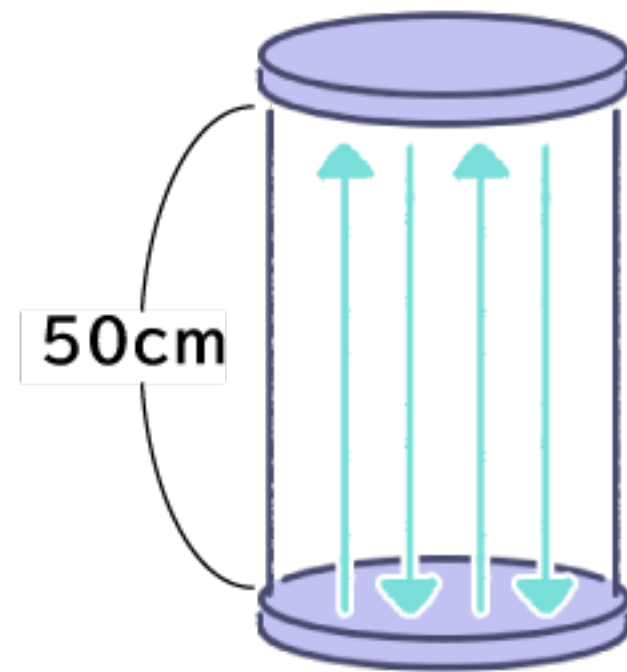
力を加えると、物体は動く  
(加速度が生じる)



アインシュタイン(26歳)



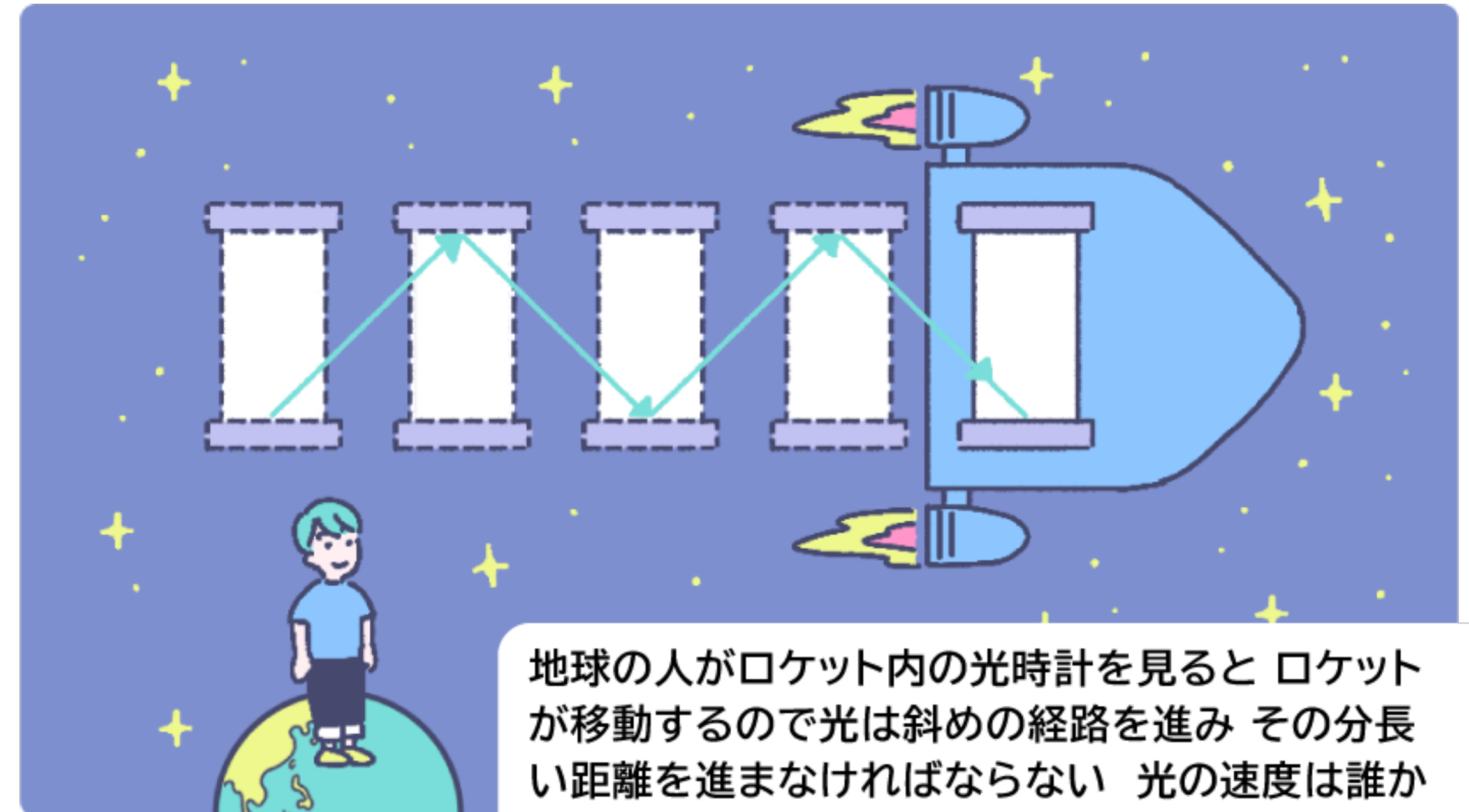
電磁気学の方程式に光速が登場した。  
光の速度は誰から見ても同じと考えよう。



光時計

光が2億9979万2458回往復すると  
「1秒」を刻む時計

## 光時計の思考実験



地球の人がロケット内の光時計を見ると ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み その分長い距離を進まなければならない 光の速度は誰から見ても一定なので ロケット内の光時計は2億9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い時間がかかる つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる

動いている人の時間の進み方は 静止している人よりも遅い

時間の進み方は相対的になる





# 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」



アインシュタイン  
(36歳)

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」

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？

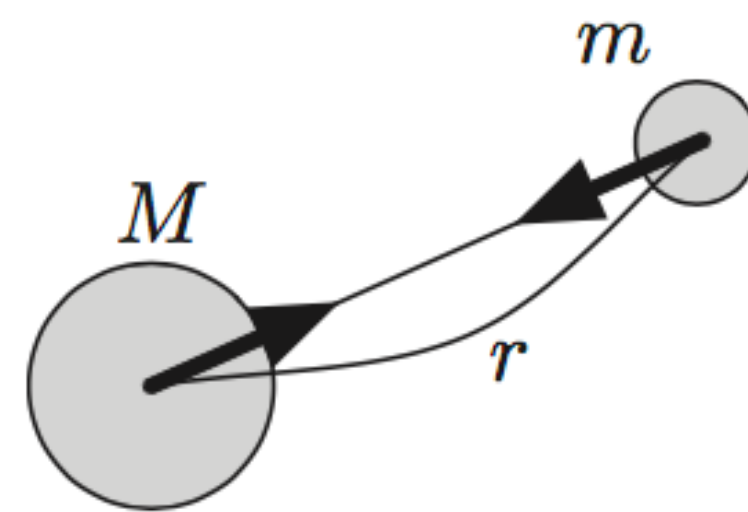


<http://hikingartist.com/>



## 万有引力の法則

すべてのものは、引力で引き合う



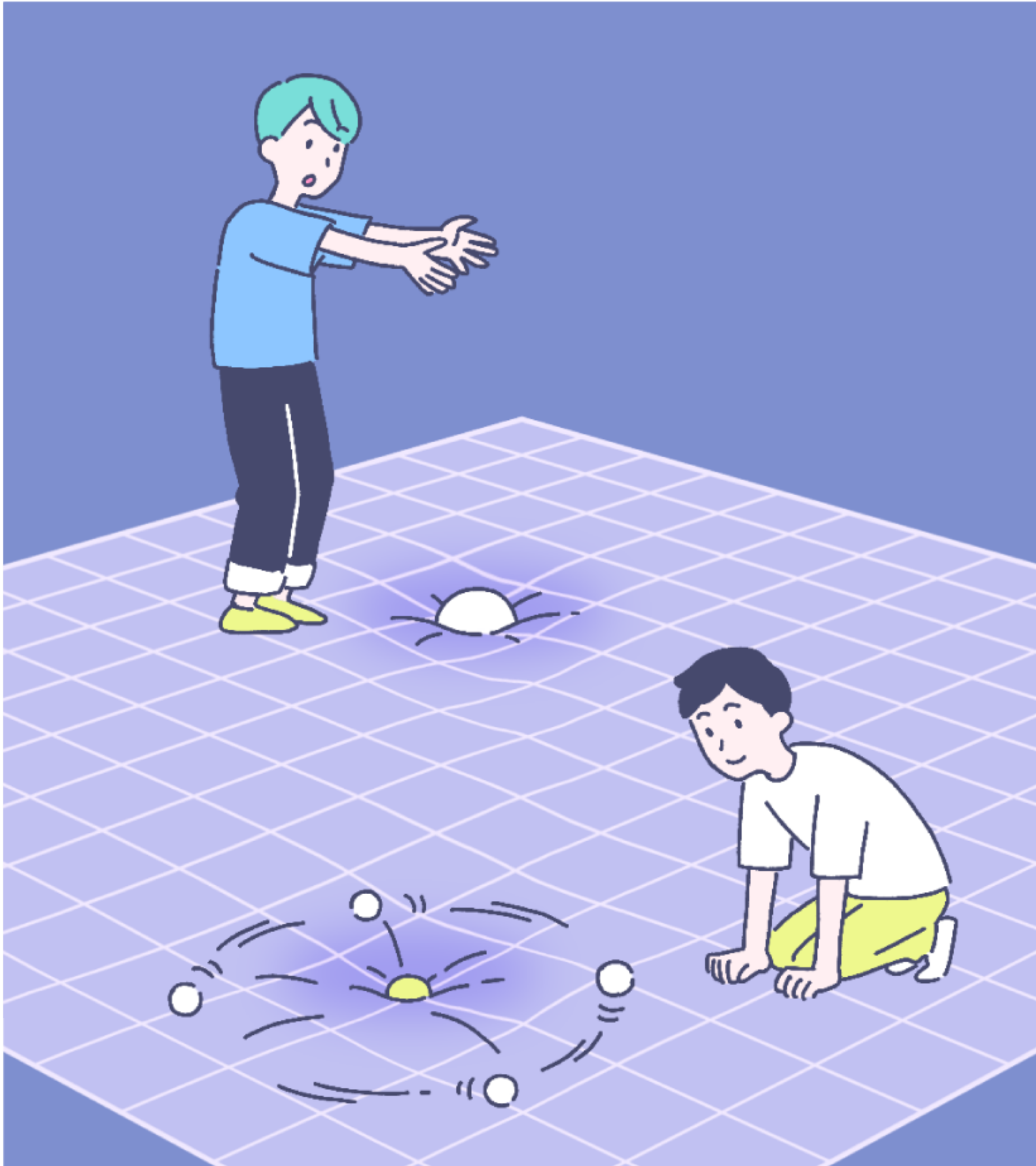
### ◆ Advanced 万有引力の法則

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．





アインシュタイン(1879-1955)

空間のゆがみが重力の原因だ

光や物体は まっすぐ進んで  
いるつもりでも 曲がって進む

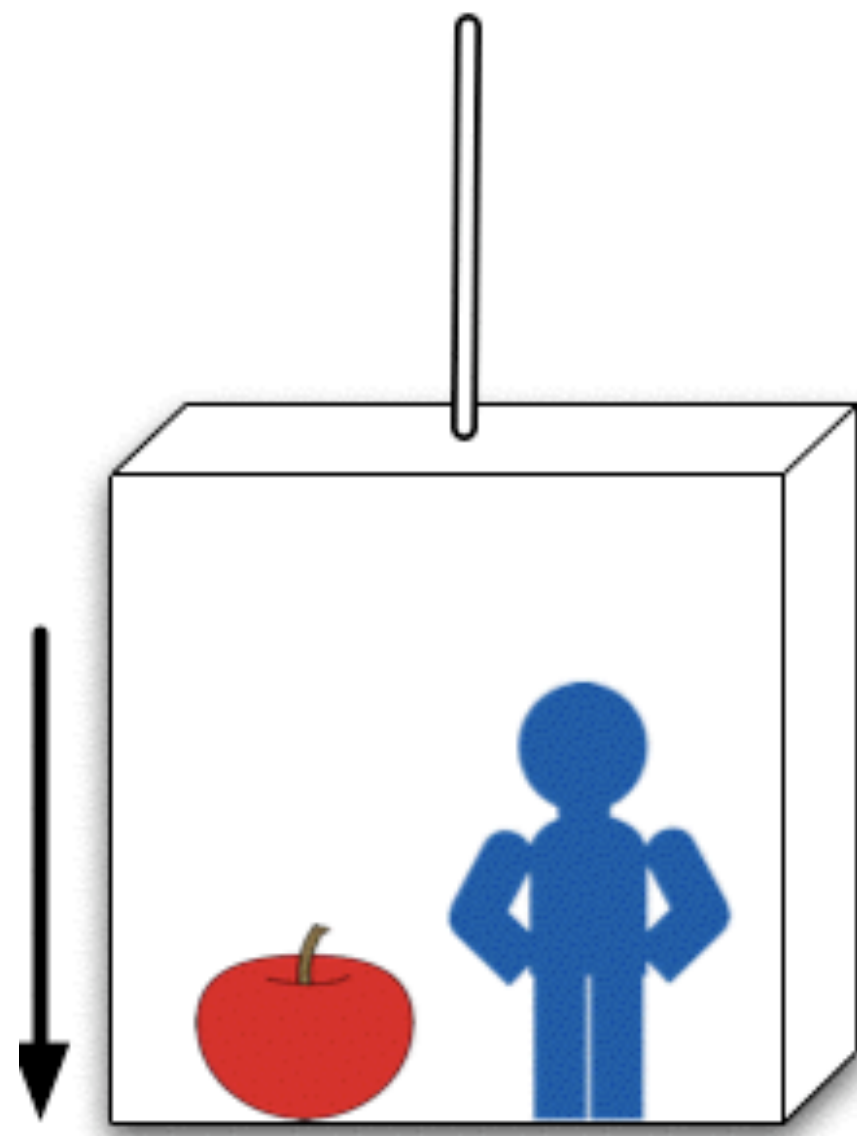


1905年の相対性原理では、等速運動しか扱っていない。  
加速度運動する場合の相対性理論はどうなるだろうか。

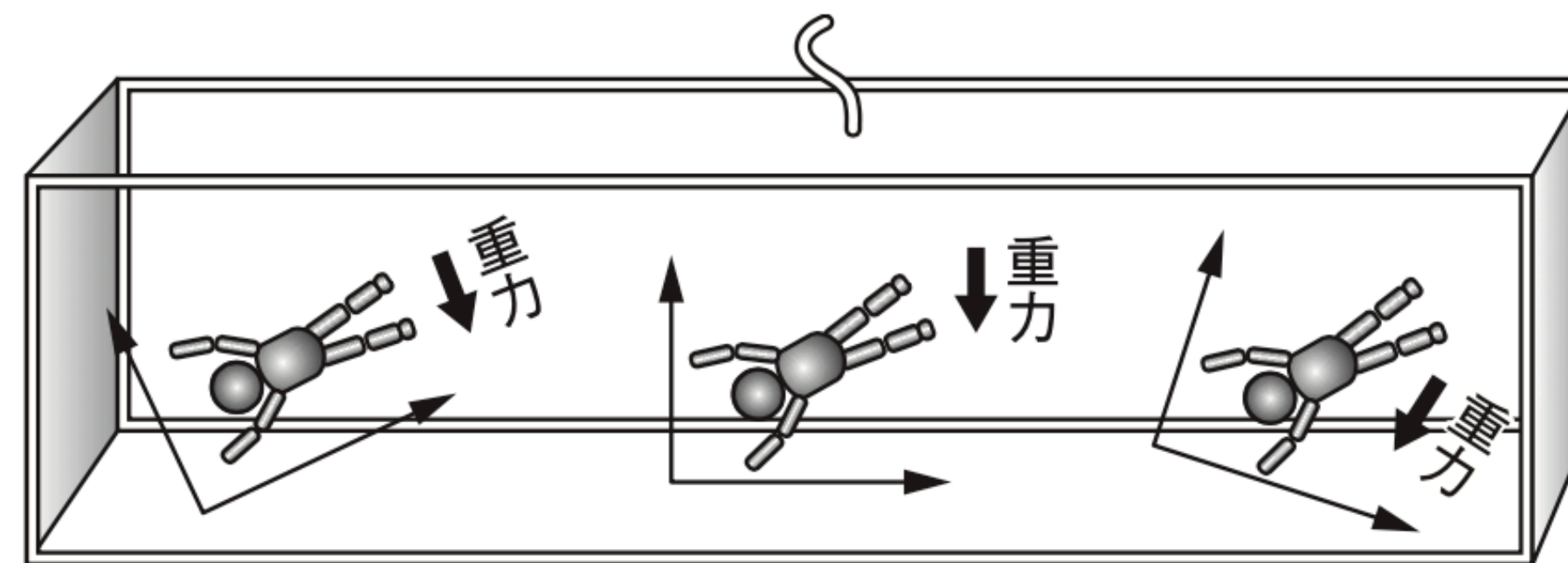
加速度運動する代表が重力のはたらきだ。  
重力の正体はなんだろうか。



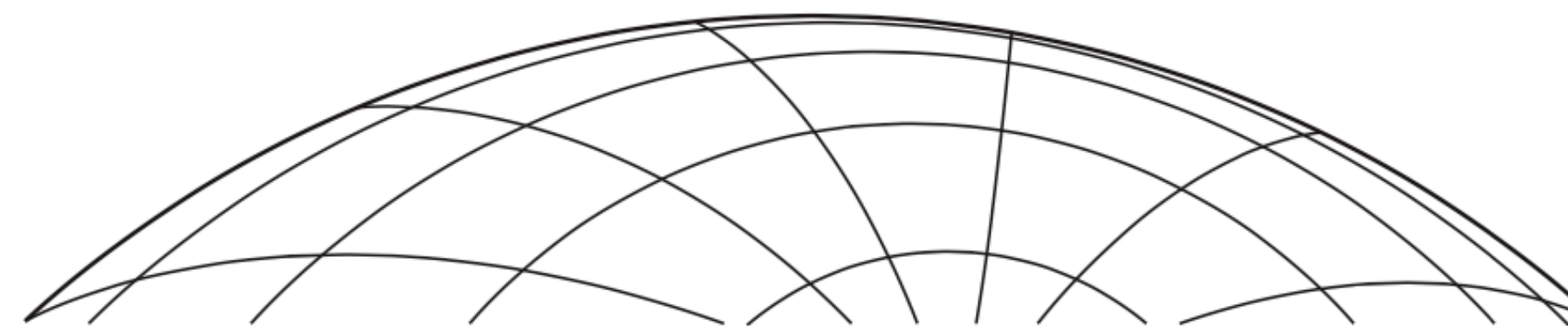
自由落下するエレベータ内では、重力がはたらいていることを感じない。  
重力は局所的には消すことができるが、大域的には消せない。



エレベーターの思考実験



↓ 地球の半径ていどの大きさのエレベータだと重力の向きがちがうので、全体で重力を打ち消すことができない。 ↓



重力の正体は 空間の性質だ

空間のゆがみが  
重力の正体だ





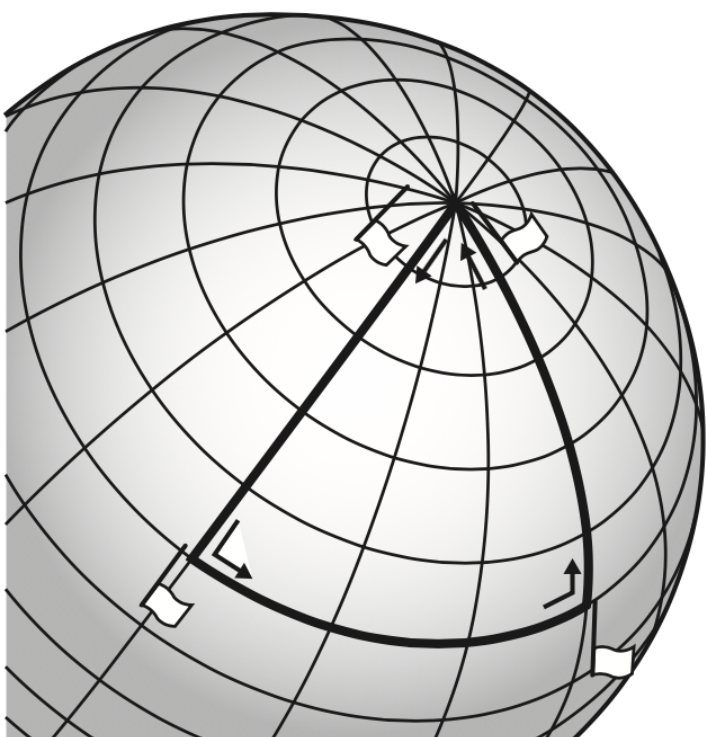
重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが  
重力の正体だ



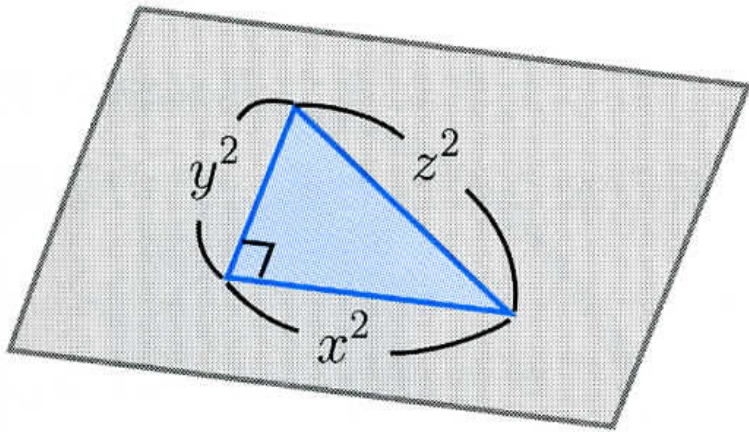
リーマン幾何学があるよ  
物理学者は深入りしない  
ほうがいいよ。

Marcel Grossmann



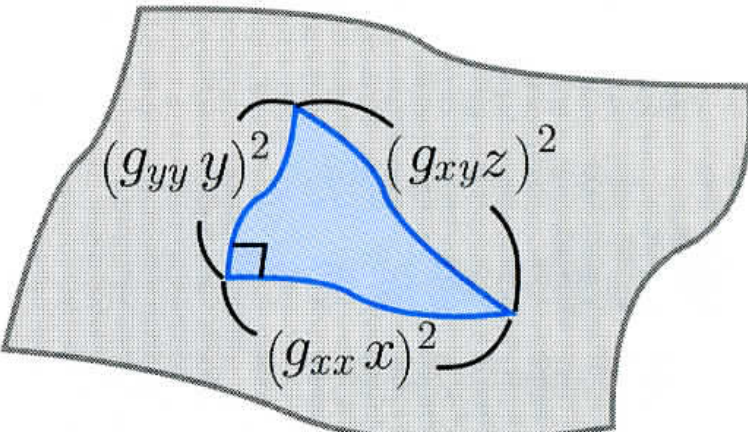
正の曲率（地球表面）

平らな面ではピタゴラスの  
定理が成り立つ。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

曲がった空間でも成立するために  
計量関数で調整する。



$$(g_{xx} x)^2 + (g_{yy} y)^2 - (g_{xy} z)^2 = 0$$

このように、曲がり具合は関数  $g_{\mu\nu}$  に押し付けて表すことができる。  
アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり  $g_{\mu\nu}$   
を解く方程式である。

重力場の方程式（アインシュタイン方程式, 1915 年）

重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時空の歪み}} = \frac{8\pi G}{c^4} \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{質量の分布}}$$

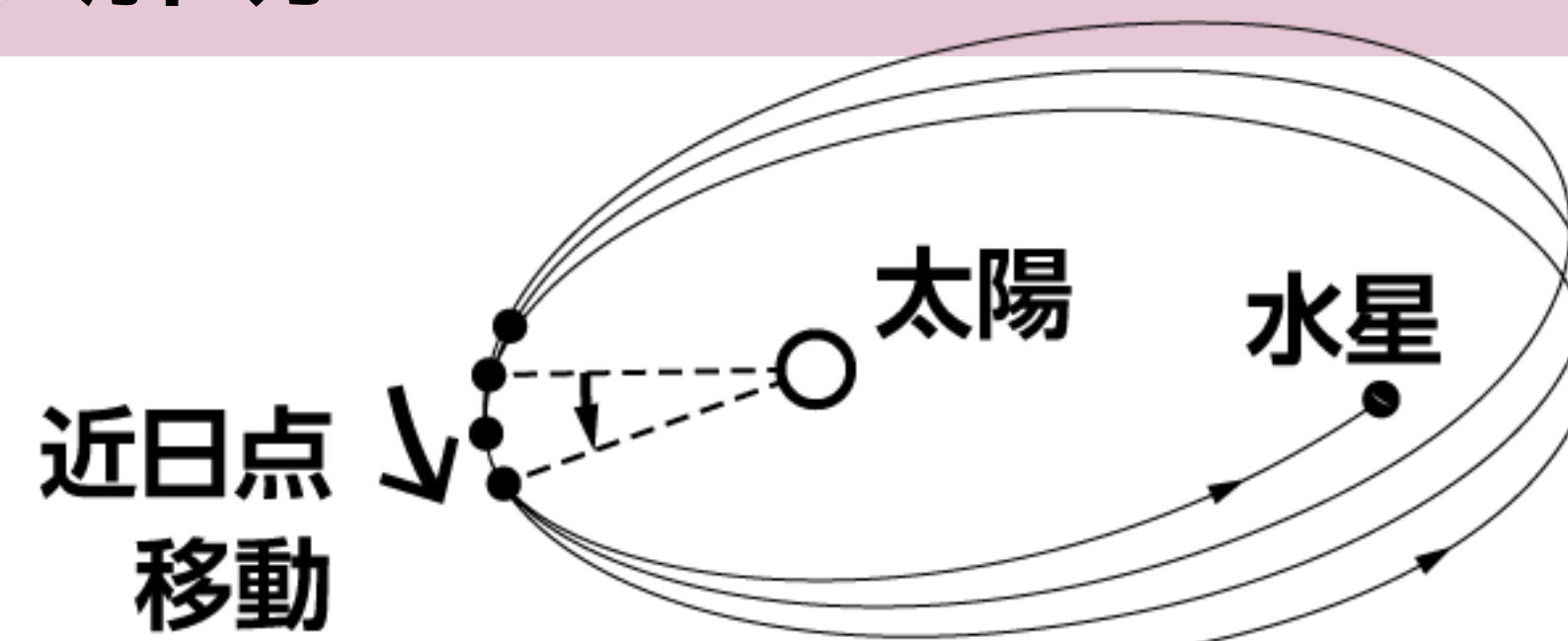
左辺はリーマン幾何学にもとづいて時空がどのように曲がっている  
のかを表している。右辺は物体がどのように分布しているのかを表  
す量である。



## 水星軌道の43秒角/100年 のずれ 謎が解明

### 水星の近日点移動の問題(ルベリエ 1854)

100年で574秒角ずれる 2250世紀で完全な「ばら模様」  
→→金星の影響で277秒角 木星で153秒角 地球で90秒角  
その他の惑星で10秒角分の説明が可能



残りの43秒角は???

1915年 アインシュタインが できたばかりの一般相対性理  
論を適用すると「43秒角の歳差運動」が出てきた

心臓の鼓動を感じた



最終的に一般相対性理論は 一つの論理的構造物としてここに完成した(1915年11月25日)

### 一般相対性理論が预言したもの

- 重力によってゆがんだ空間では 光の経路も曲がる(重力レンズ)
- 重力によってゆがんだ空間では 時間の進み方は遅くなる(重力赤方偏移)
- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける(ブラックホール)
- 宇宙全体は動的でなければならない(膨張宇宙)
- 重力波が宇宙空間を伝わる(重力波)

✗ ブラックホール特異点は簡単  
すぎる仮定をしたからだ

✗ 宇宙は膨張するはずない

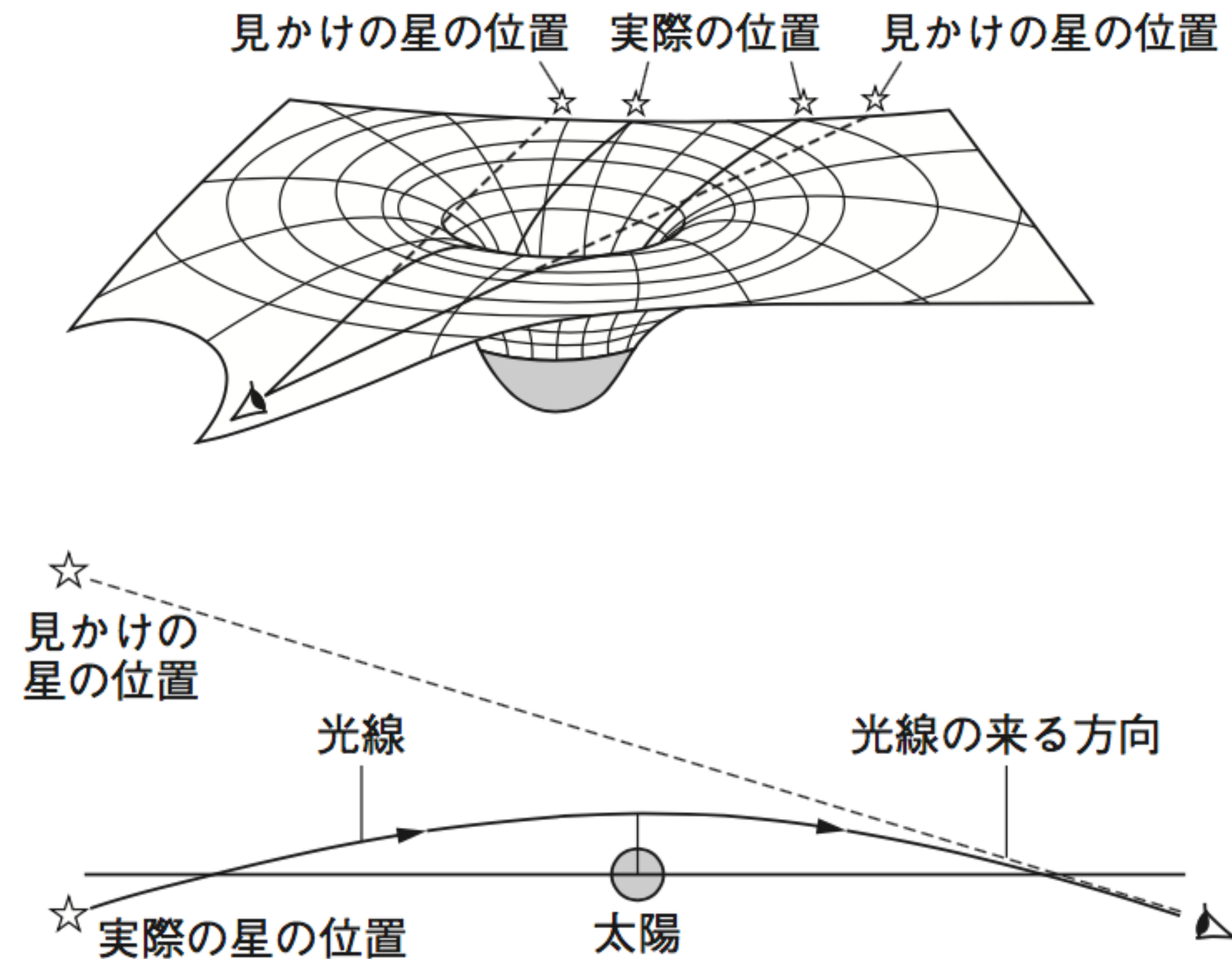
✗ 重力波は座標系の変換で消せる

✗ 一般相対性理論は日常生活に影響することはない

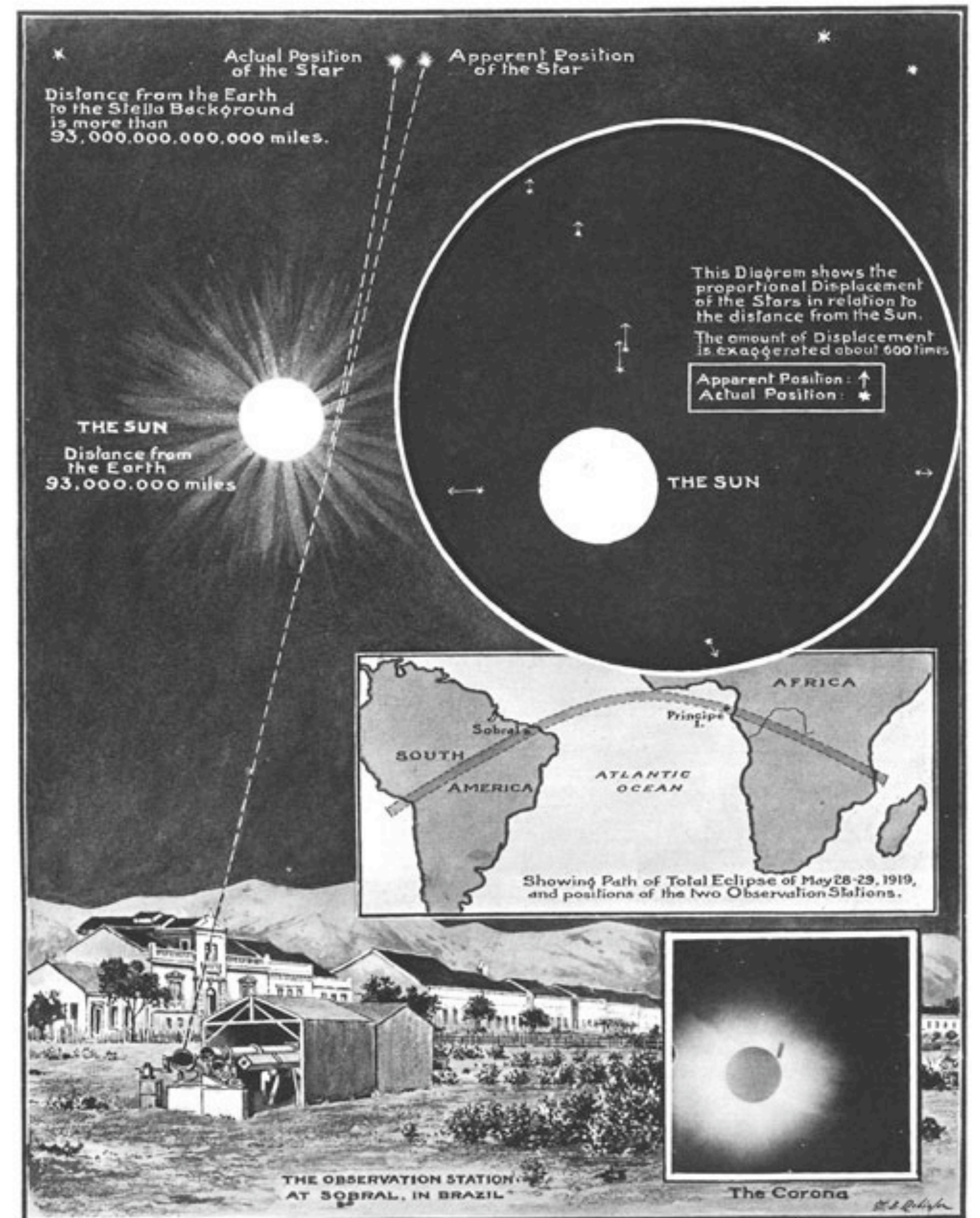


## 1919年5月 皆既日食: 太陽の近くを通過する光は曲がる

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



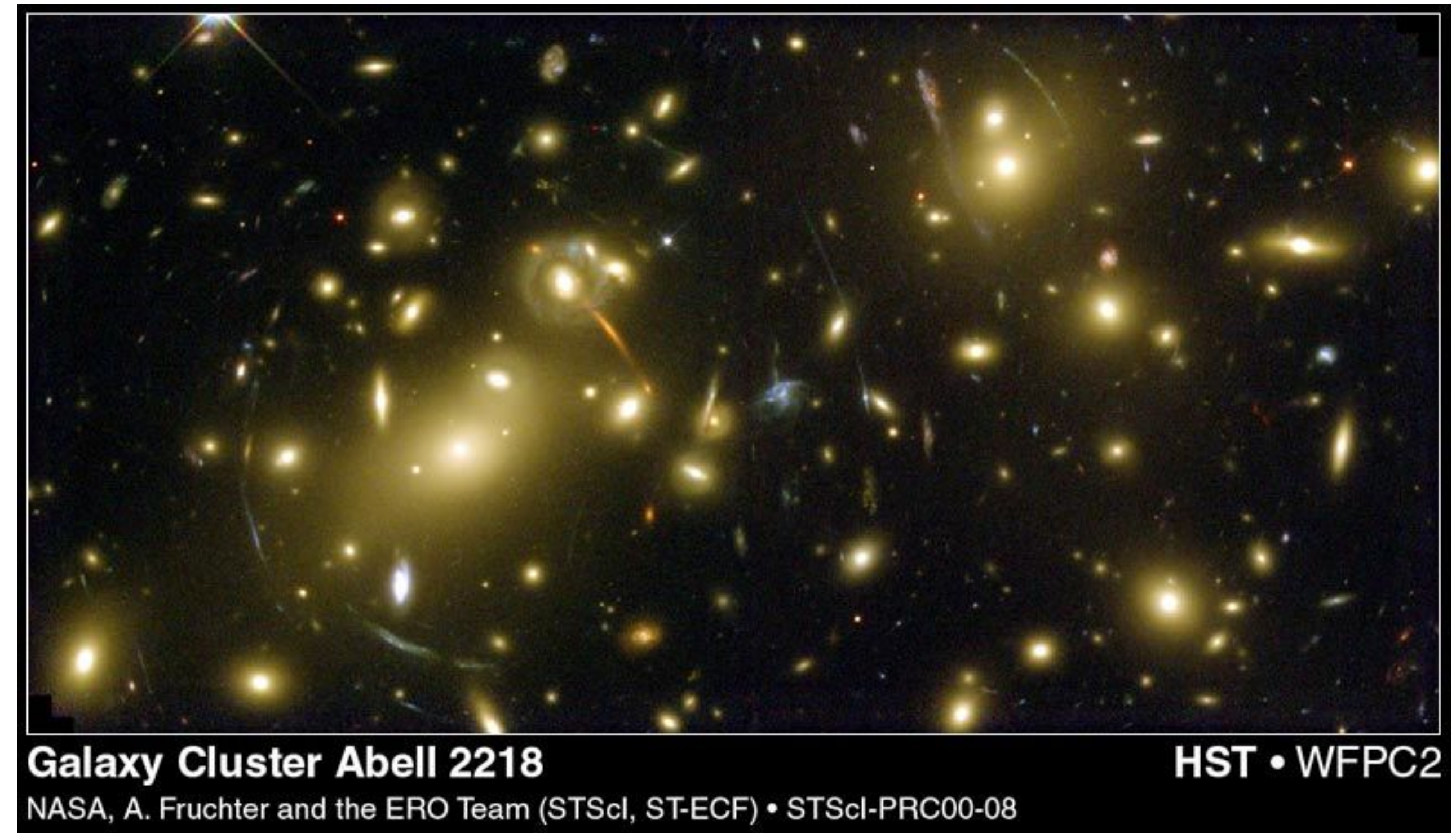
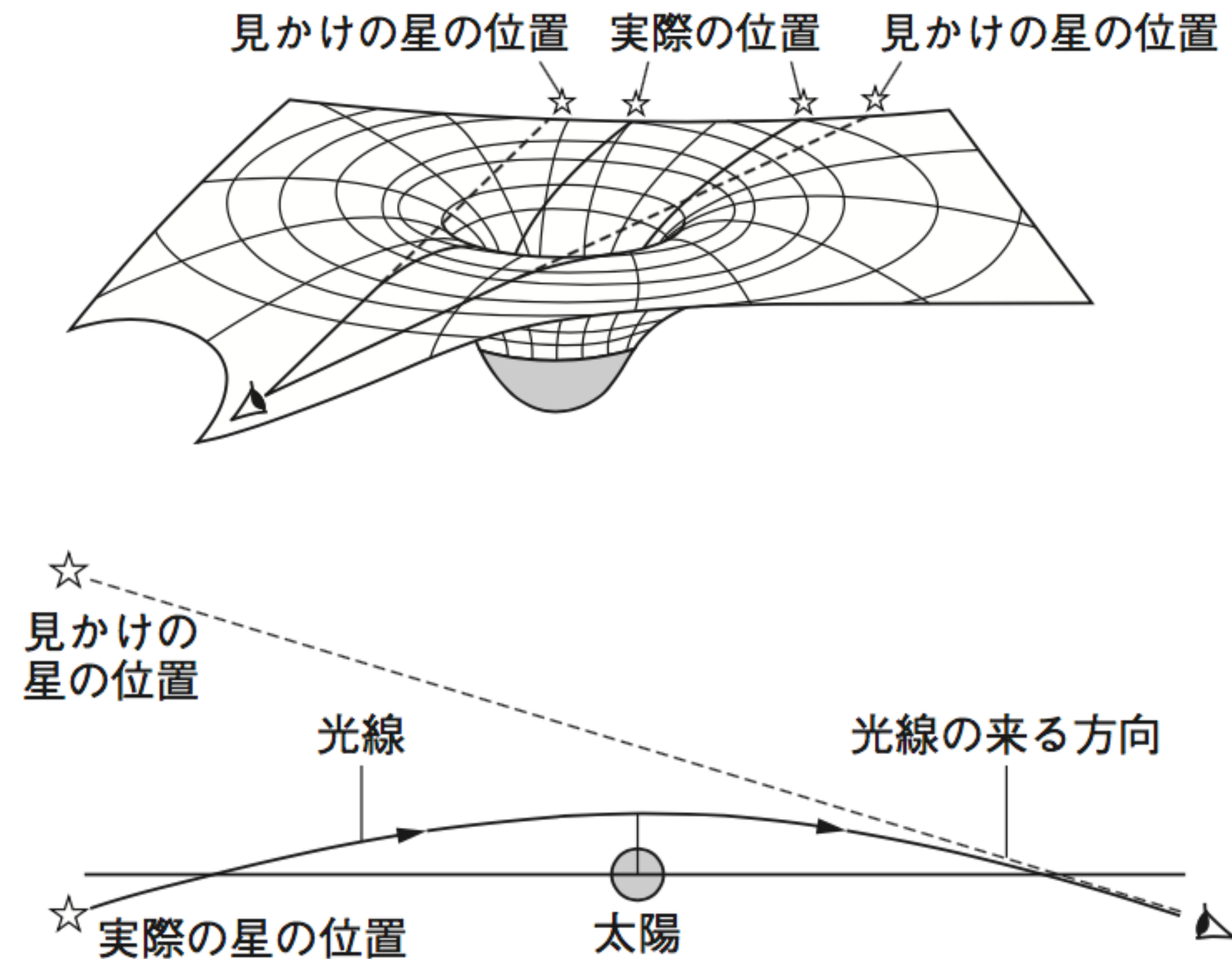
1919年5月の皆既日食で  
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が  
普段の位置とずれていた





## 1919年5月 皆既日食: 太陽の近くを通過する光は曲がる

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



いまでは普通に重力レンズ効果として観測される

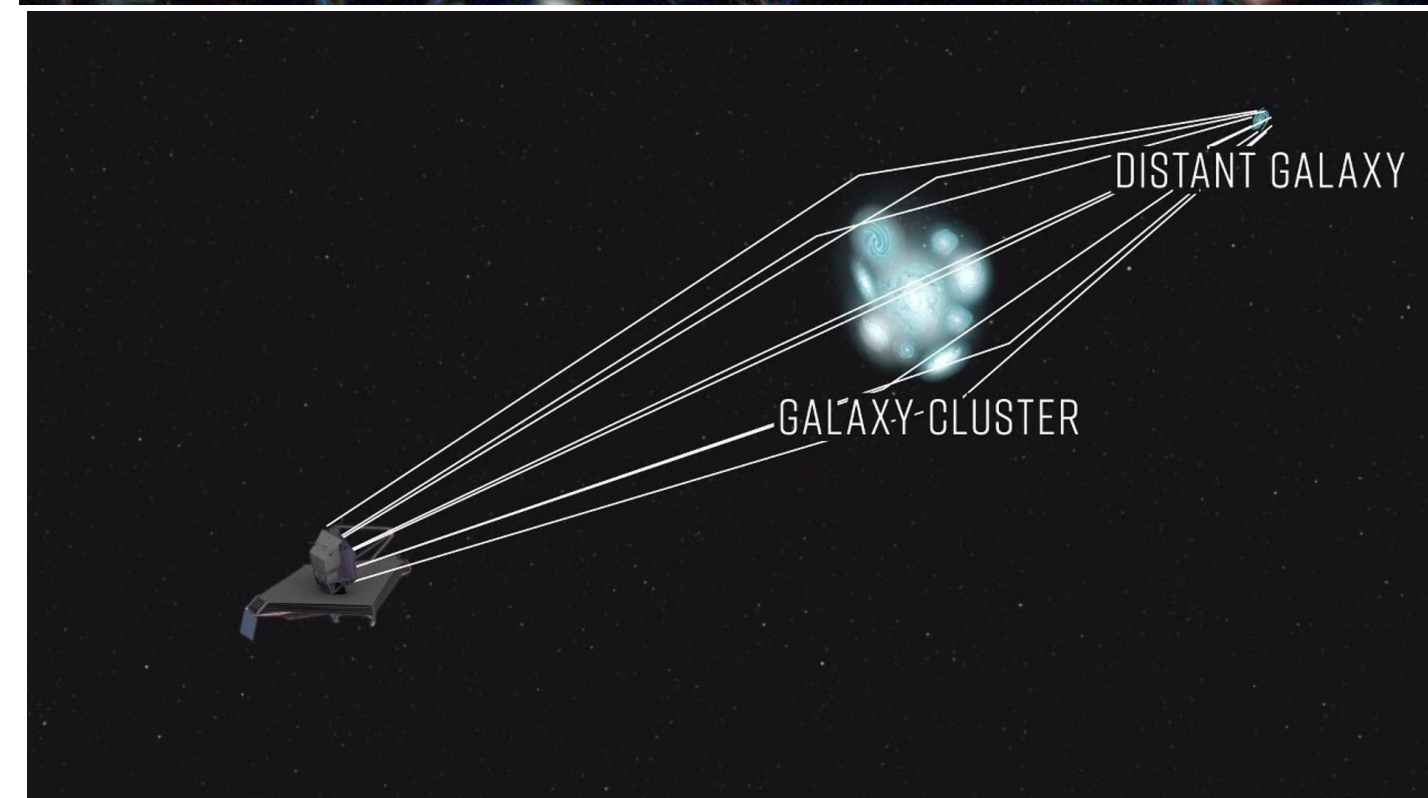
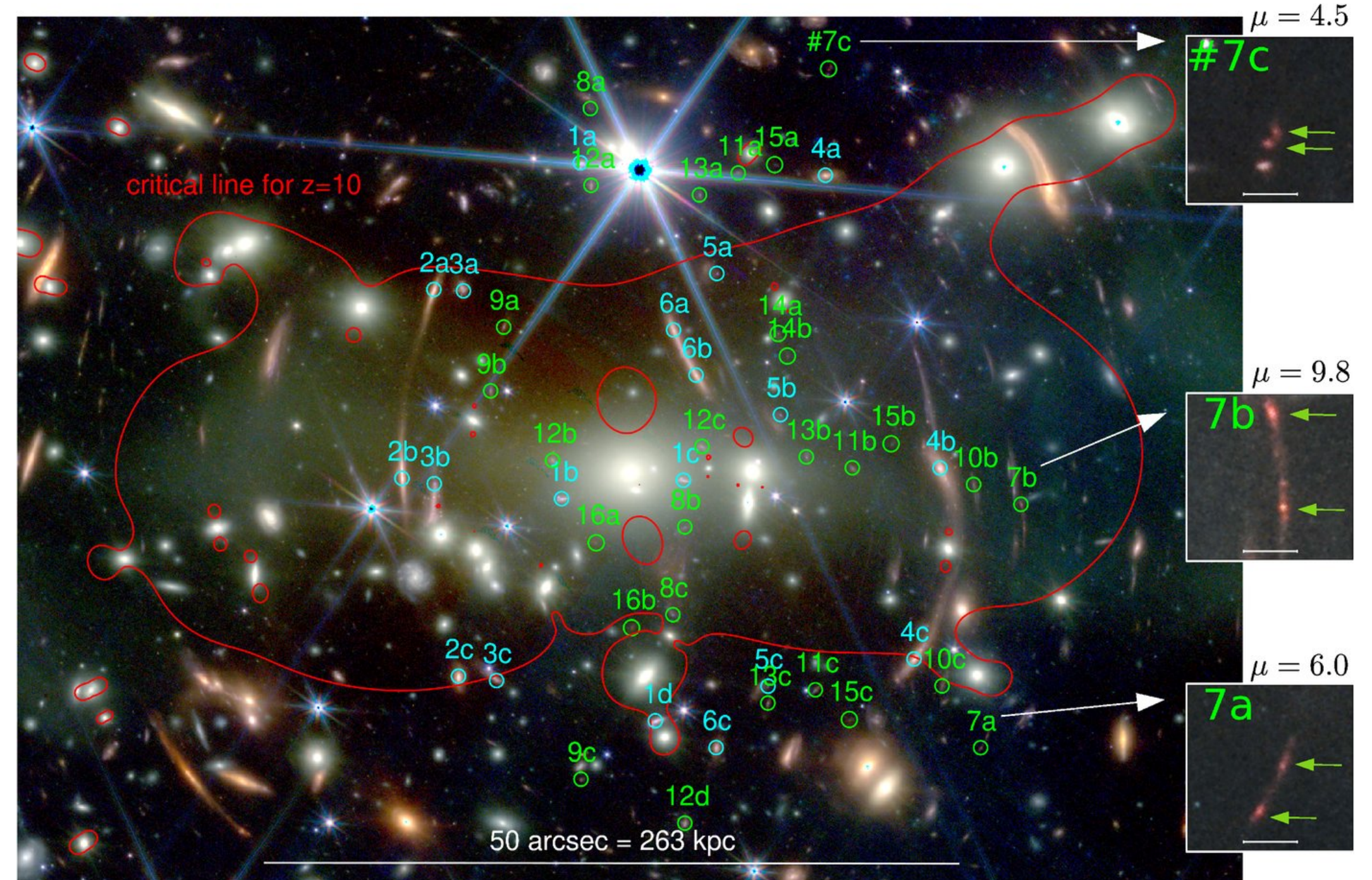
1919年5月の皆既日食で  
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が  
普段の位置とずれていた



## 重力レンズ効果は, ふつうの現象として観測されている

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる

JWSTによる撮影, 2022年



<https://www.mpg.de/19028990/galaxies-behind-a-gravitational-magnifier>



# Sの科学 Yの科学

## Sの科学

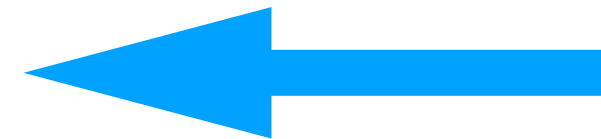
physics<sub>S</sub> 物理  
mathematics<sub>S</sub> 数学  
statistic<sub>S</sub> 統計学  
genetic<sub>S</sub> 遺伝学

## Yの科学

astronomy<sub>Y</sub> 天文学  
economy<sub>Y</sub> 経済学  
biology<sub>Y</sub> 生物学  
archaeology<sub>Y</sub> 考古学  
anthropology<sub>Y</sub> 人類学  
sociology<sub>Y</sub> 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

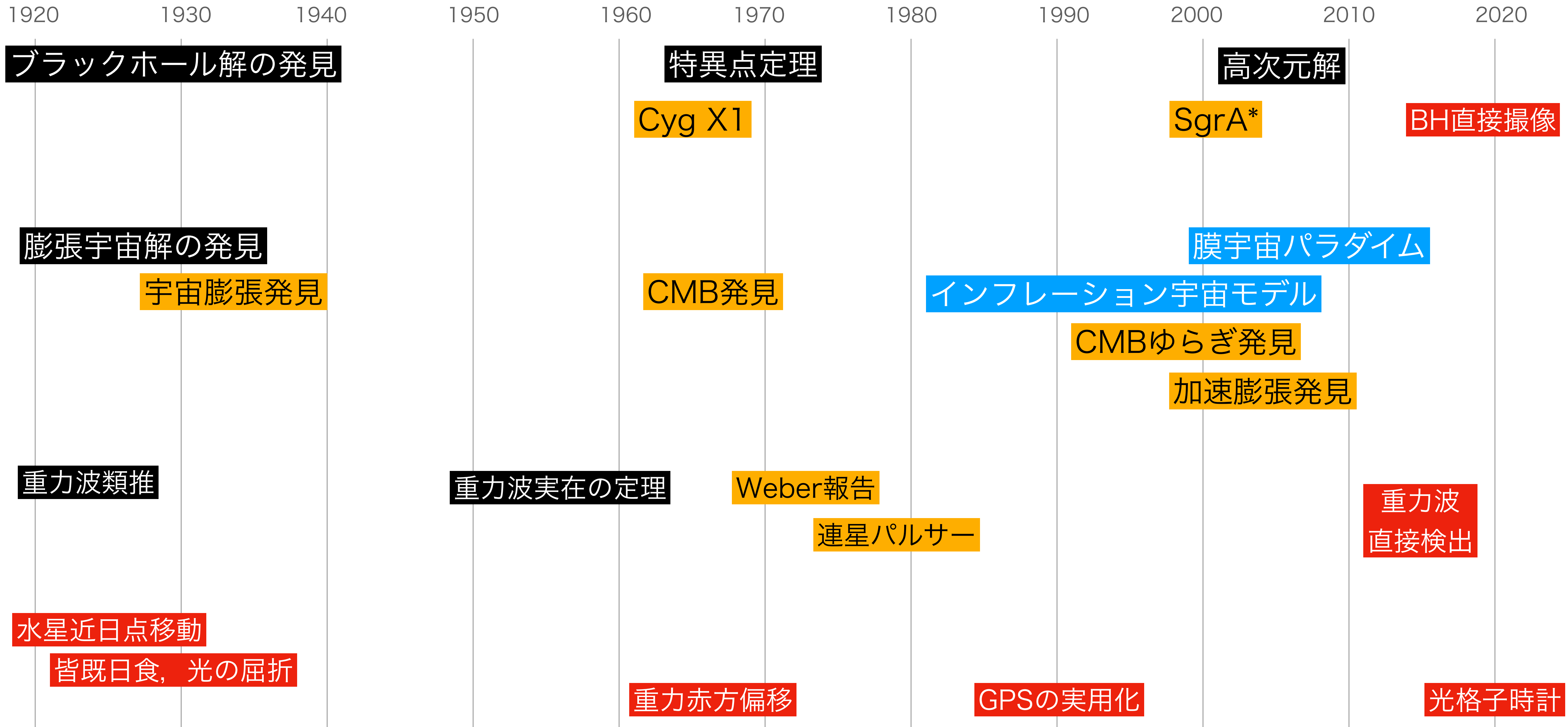
---

相対性理論



ブラックホール  
膨張宇宙  
重力波

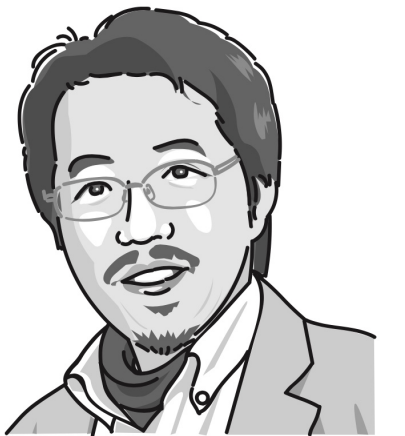






# 相対性理論の検証の歴史と重力波天文学

真貝寿明(しんかいひさあき)  
大阪工業大学情報科学部

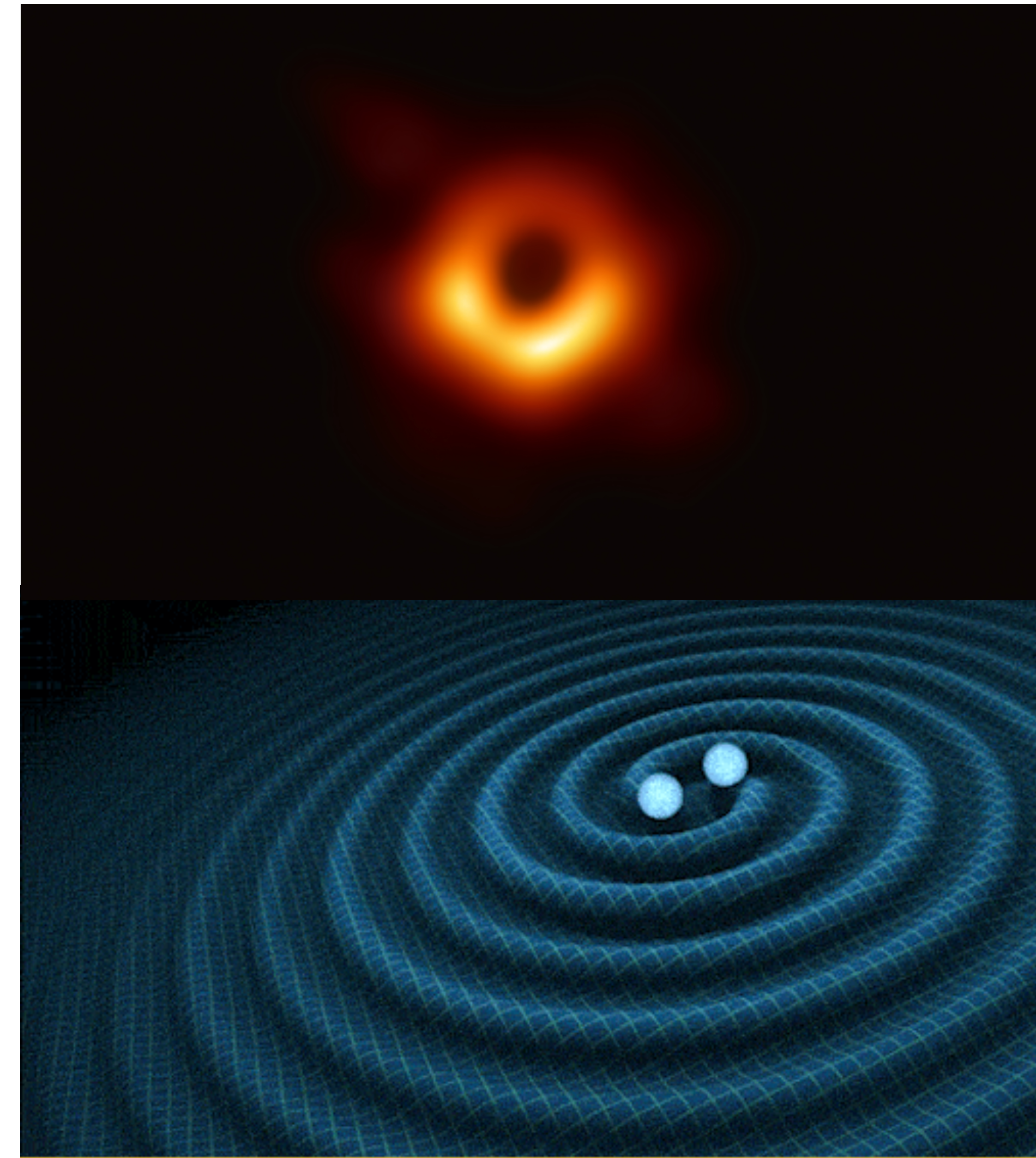


1. 相対性理論とは
2. ブラックホール
3. 相対性理論は正しいのか問題
4. 重力波

このスライドの取得先

[https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511\\_AsashiCulture.pdf](https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511_AsashiCulture.pdf)

202511 朝日カルチャー slide





## シュヴァルツシルト, もっとも簡単だが奇妙な解を発見する

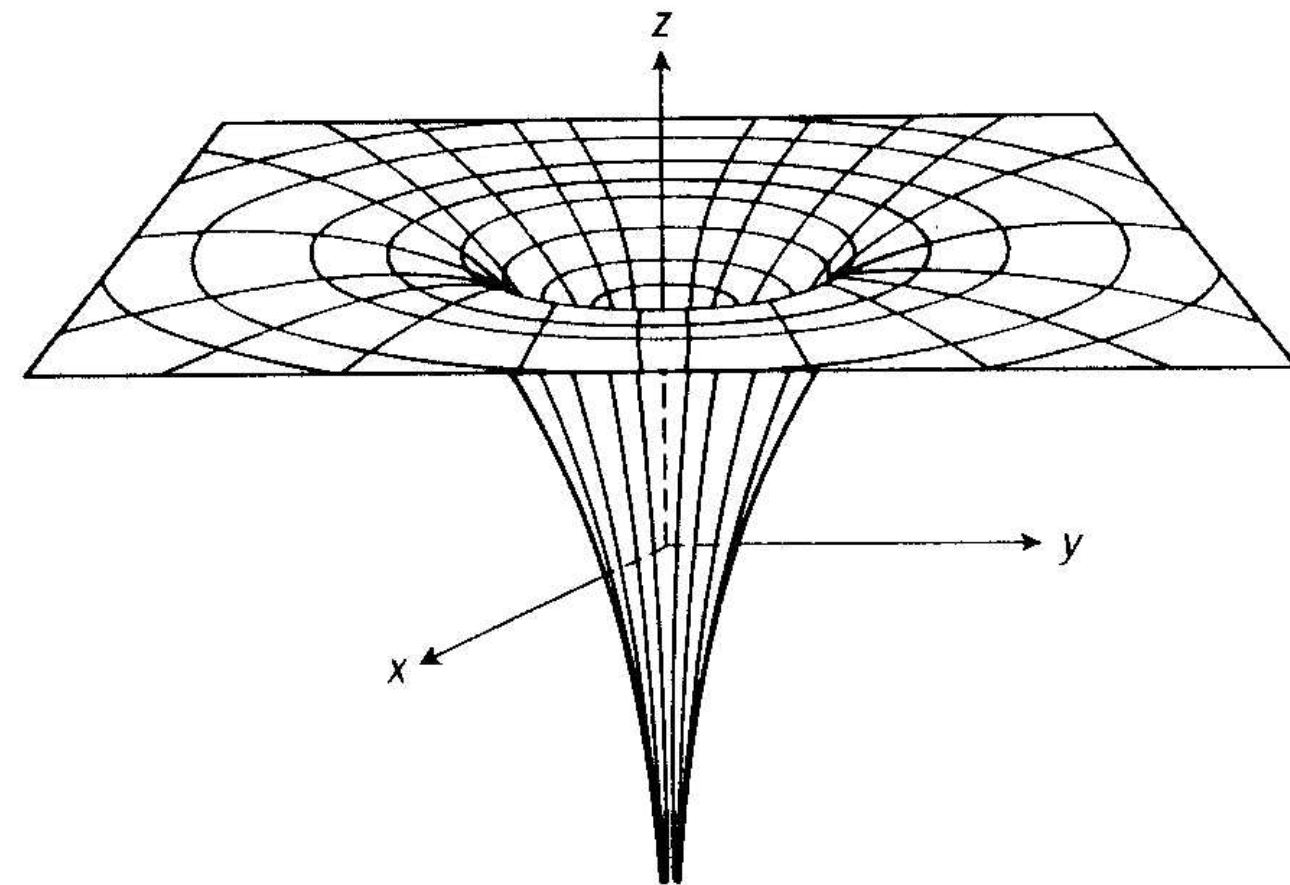
球対称, 真空での方程式の厳密解(1916年)

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

ゼロ割で無限大が生じる奇妙な解になってしまった。

計算は正しい。仮定が簡単すぎたのではないか。

Schwarzschild



困ったことに, ……

$r=0$  で特異点

⇒ 今でも困ってる

$r=2GM/c^2$  でも特異点

⇒ ブラックホールの境界





# アインシュタインはブラックホールという言葉を知らずに亡くなっている

1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

A. Einstein 1879-1955

重力崩壊

35 Tolman, 39 Oppenheimer-Volkoff  
39 Oppenheimer-Snyder

「重力で切り離された領域」

「ブラックホール」

67 Wheeler

「重力崩壊星コラプサー」  
「凍結星」

1964年Science Newsletter(Jan 18)にて、ジャーナリストのAnn Elizabeth Ewingが、「“Black Holes” in Space」という記事を書いたのが、はじめ。

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

## "Black Holes" in Space

The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing

➤ SPACE may be peppered with “black holes.”

This was suggested at the American Association for the Advancement of Science meeting in Cleveland by astronomers and physicists who are experts on what are called degenerate stars.

Degenerate stars are not Hollywood types with low morals. They are dying stars, or white dwarfs, and make up about 10% of all stars in the sky.

The faint light they emit comes from the little heat left in their last stages of life. It is not known how a star quietly declines to become a white dwarf.

Degenerate stars are made of densely packed electrons and nuclei, or cores of atoms. They are so dense that a thimbleful of their matter weighs a ton.

Some such stars are predicted in theory to have a density of one million tons per thimbleful. When this happens, the star is essentially made of neutrons and strange particles.

Because a degenerate star is so dense, its gravitational field is very strong. According to Einstein's general theory of relativity, as mass is added to a degenerate star a sudden collapse will take place and the intense gravitational field of the star will close in on itself.

Such a star then forms a “black hole” in the universe.

Modern tools, such as telescopes on an orbiting space platform, may be used to detect such black holes and to help determine how matter behaves when it is enclosed by its own gravitational field.

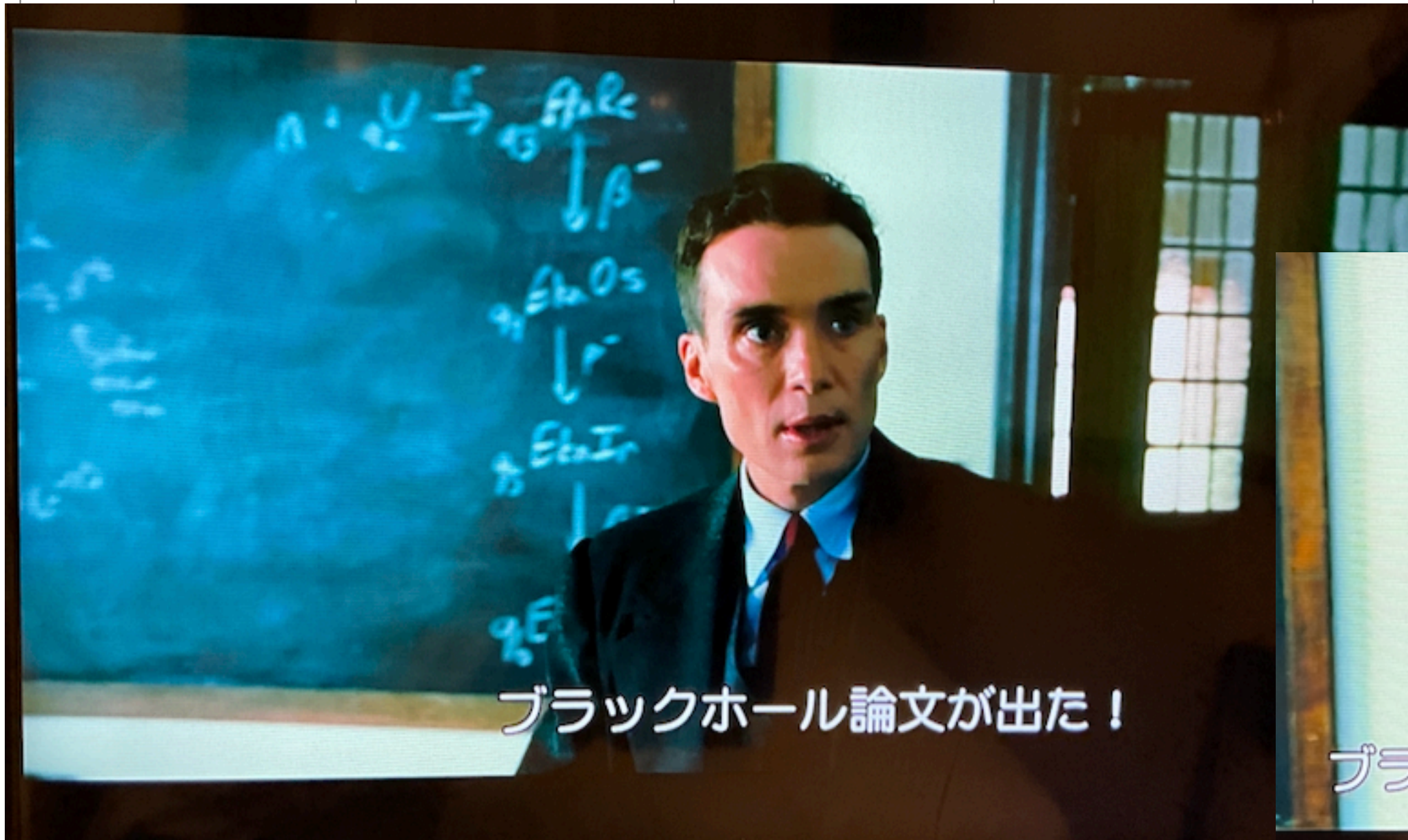
The light from the most famous white dwarf star, Sirius B, a companion to Sirius—which is the brightest star in the heavens visible from earth—has been captured using the 200-inch telescope atop Mt. Palomar. This was done as part of a program to study at least 20 white dwarfs.

Preliminary analysis of the light from Sirius B indicates that it has an effective temperature of 16,800 degrees Kelvin, or 30,000 degrees Fahrenheit. Its radius can be calculated from the temperature, and is only nine-thousandths that of the sun.

The star must therefore consist mainly of helium or heavier elements.

The speakers at the symposium were Drs. A. G. W. Cameron of the National Aeronautics and Space Administration's Goddard Institute for Space Studies, New York; Charles Misner of the University of Maryland; Volker Weidemann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, and J. B. Oke of California Institute of Technology. The symposium was arranged by Dr. Hong-ye Chiu of the Goddard Institute for Space Studies.

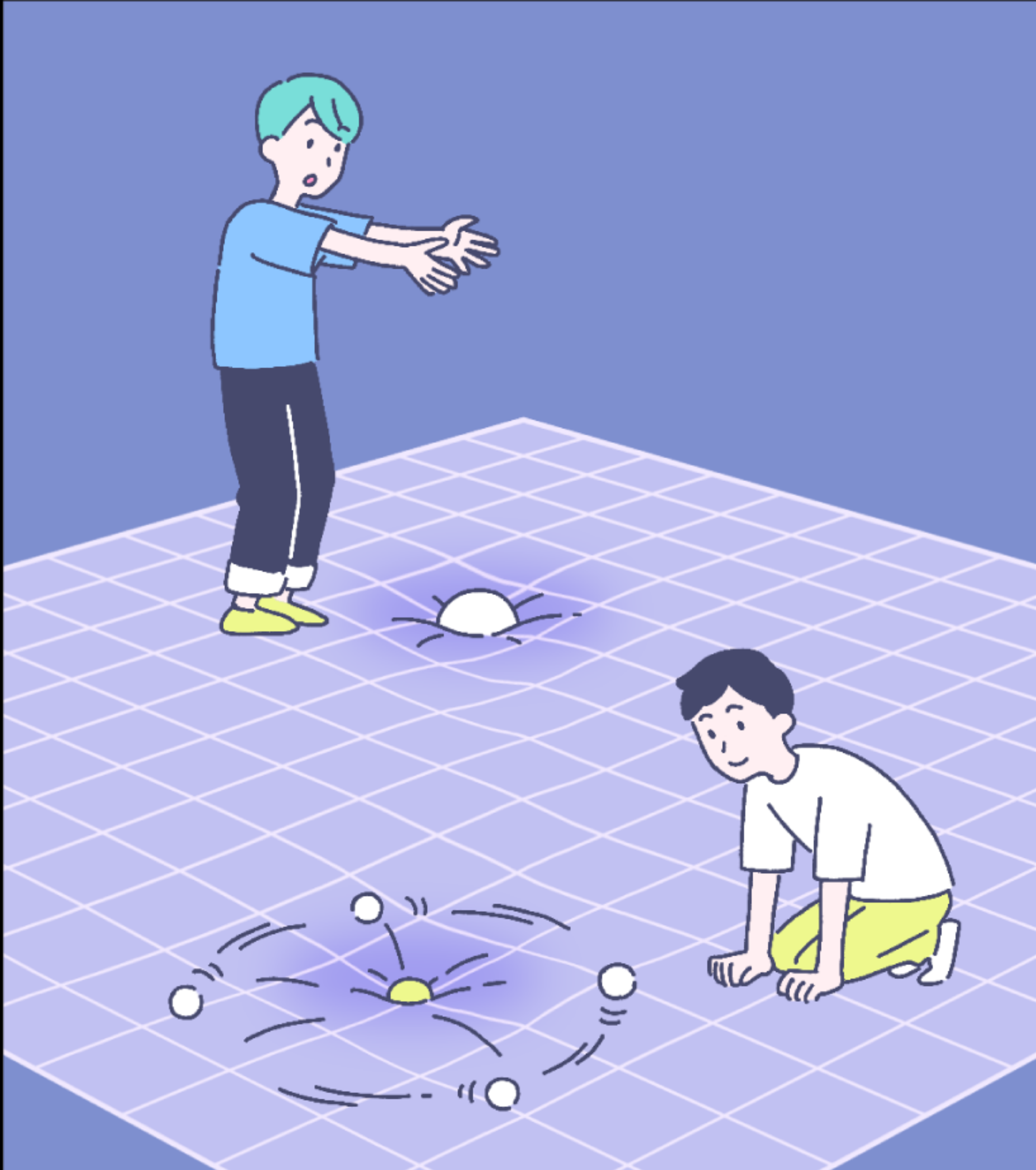
• Science News Letter, 85:39 Jan. 18, 1964



映画「オッペンハイマー」時代考証ミス



# 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

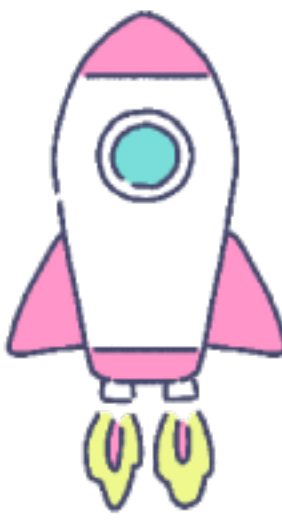
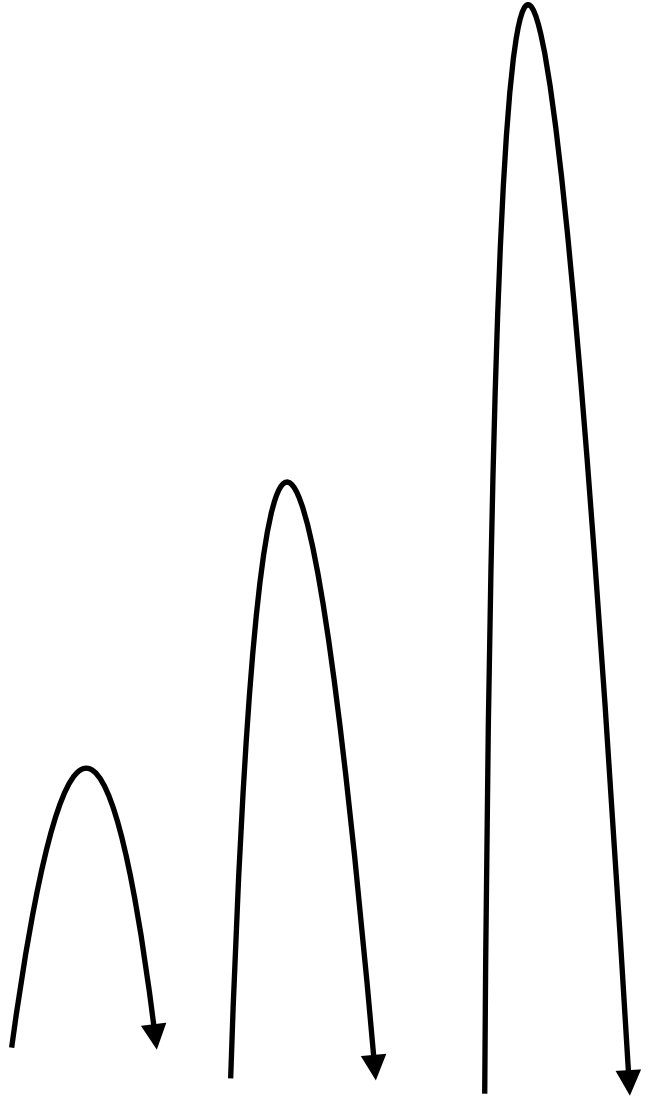
ホイーラー  
命名者については諸説あります



# 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

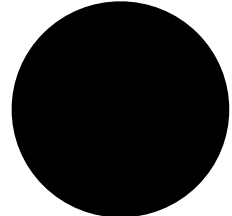
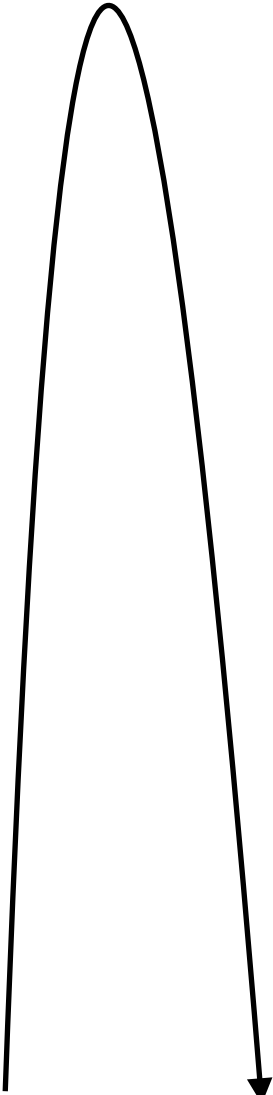


秒速  
30万 km



光は当然  
脱出できる

光も  
脱出できない



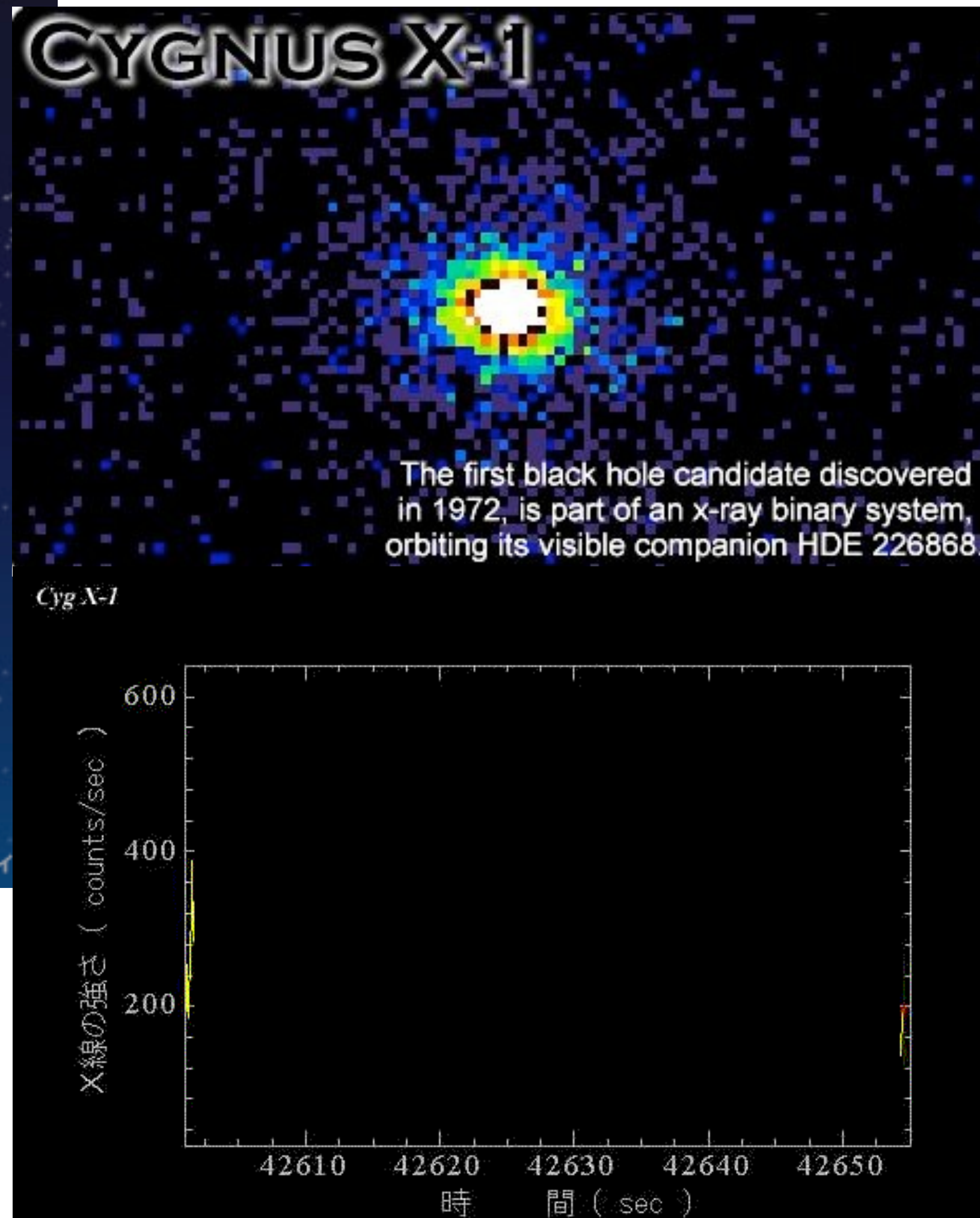
地球質量が半径9mmになったら  
太陽質量が半径2kmになったら  
ブラックホール



# 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？

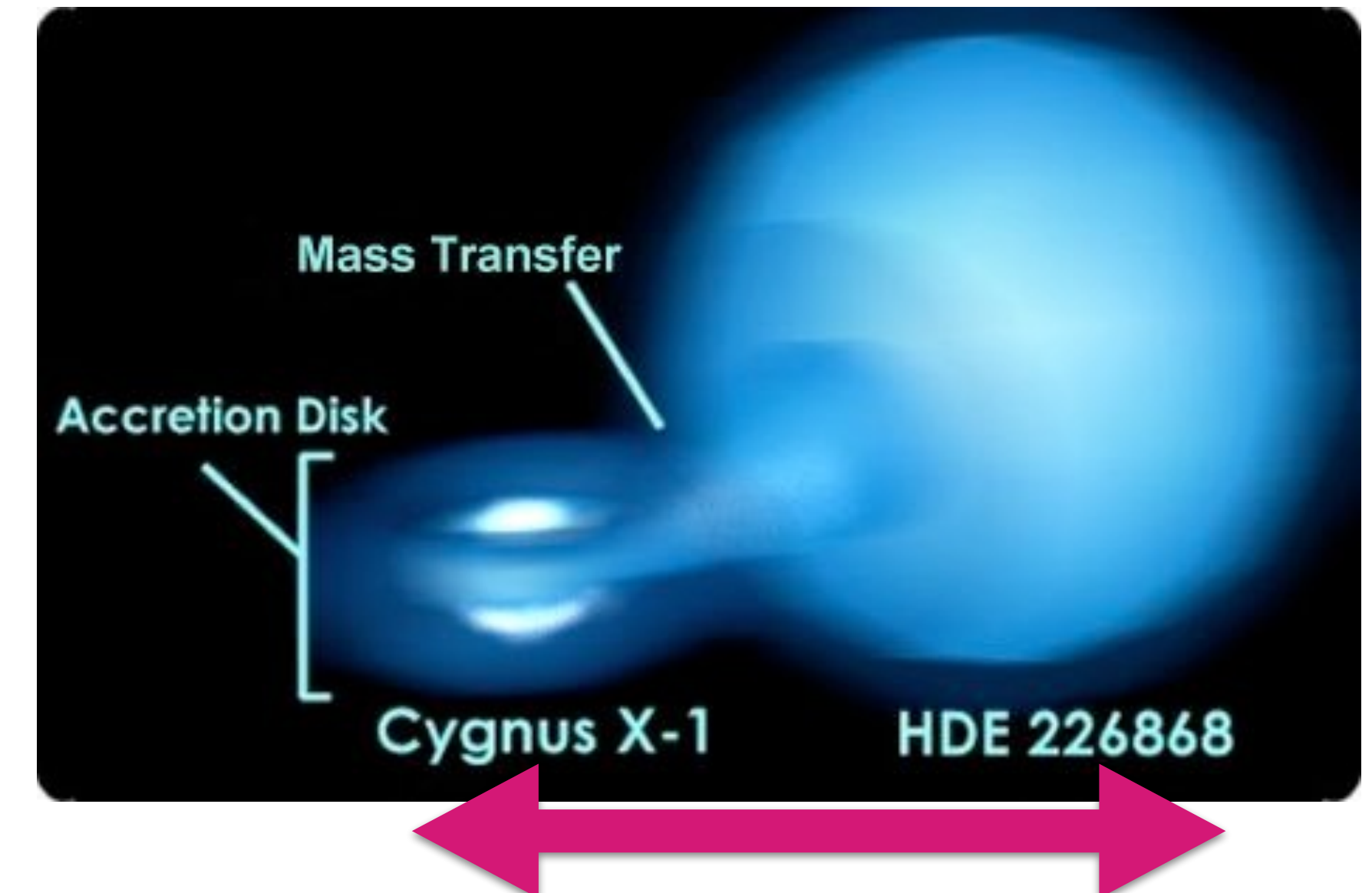


6000光年先



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

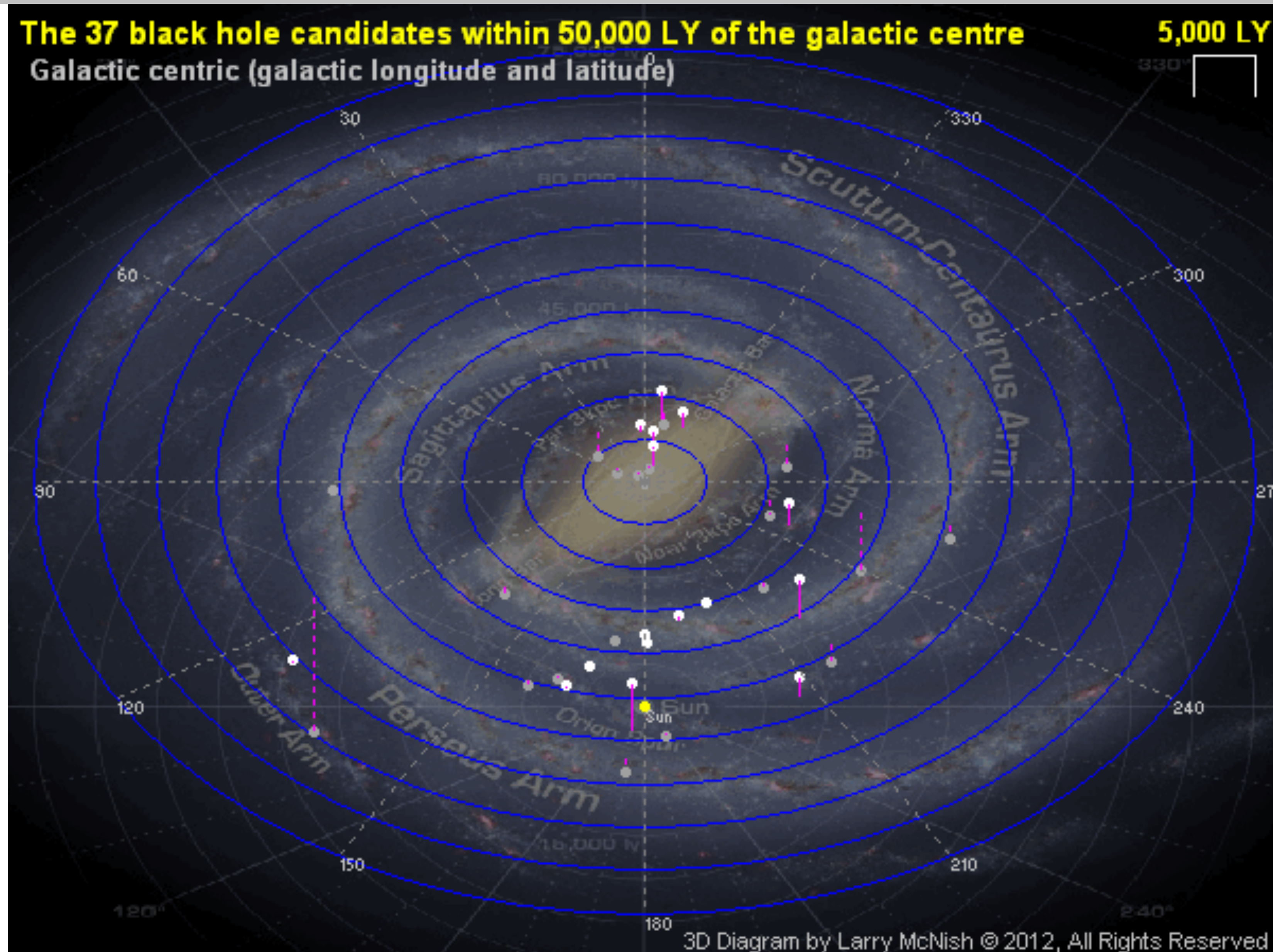
重くて小さな天体

はくちょう座 X-1 はブラックホール



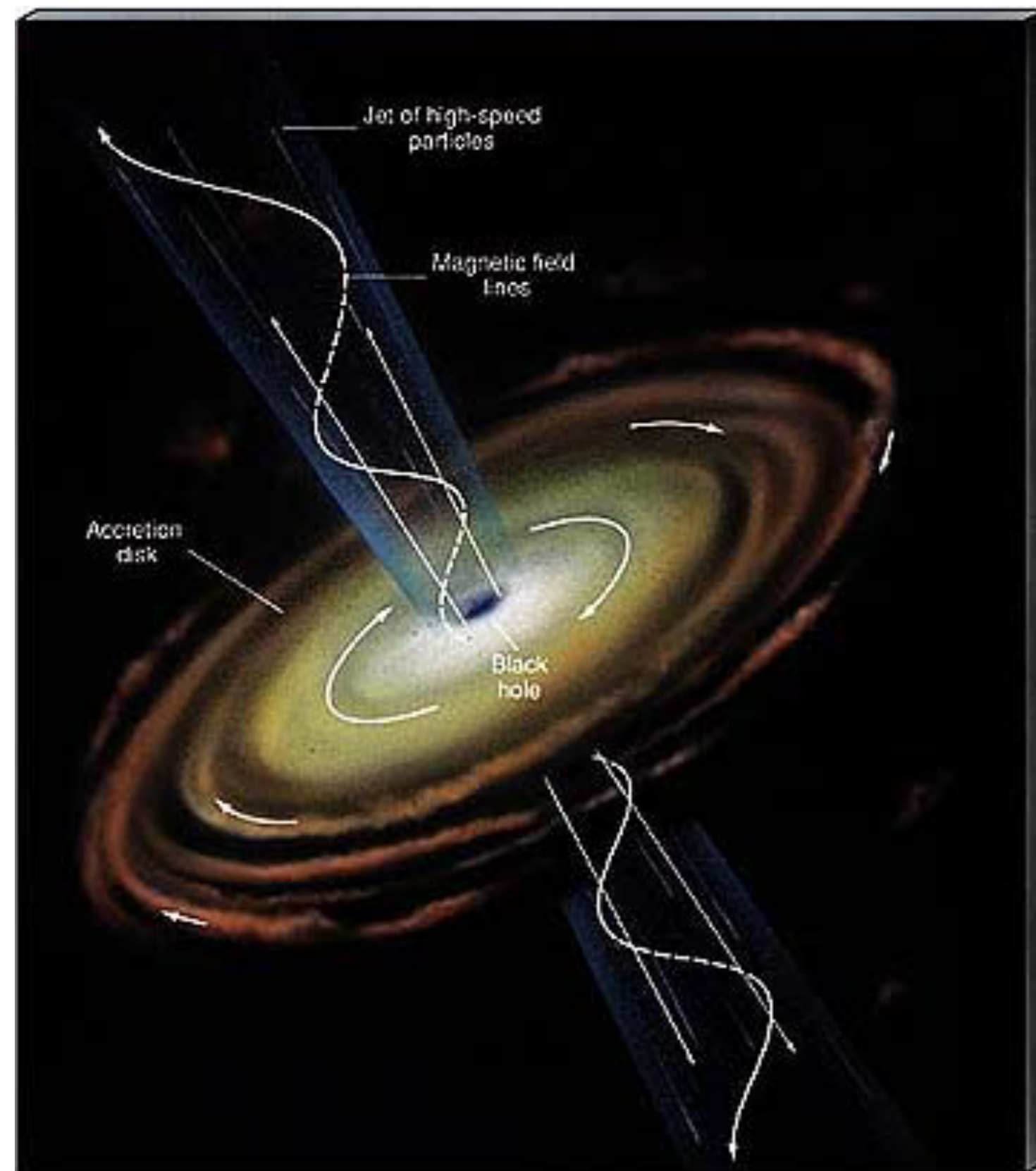
# ブラックホール候補天体は50以上

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





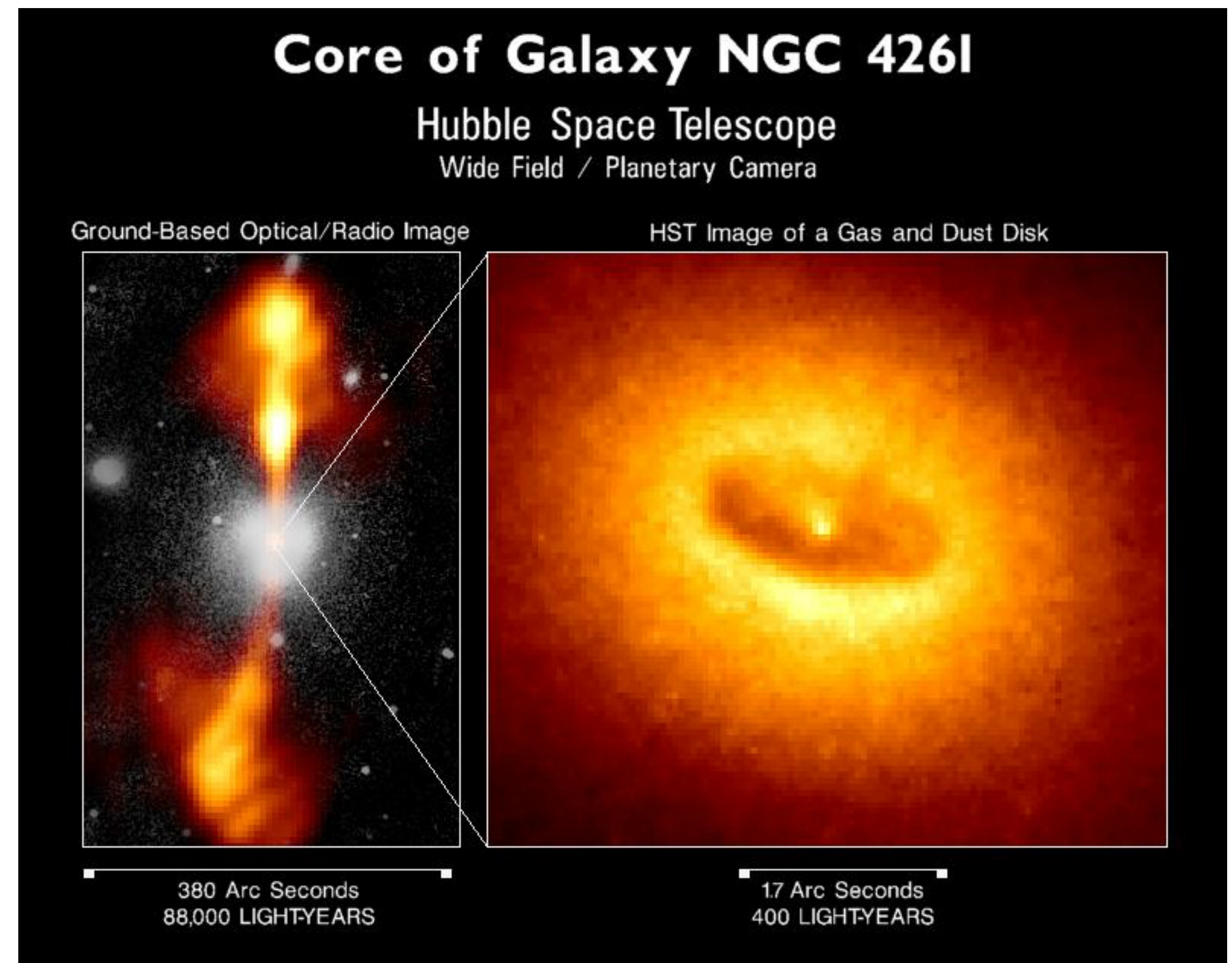
## ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？



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

想像図

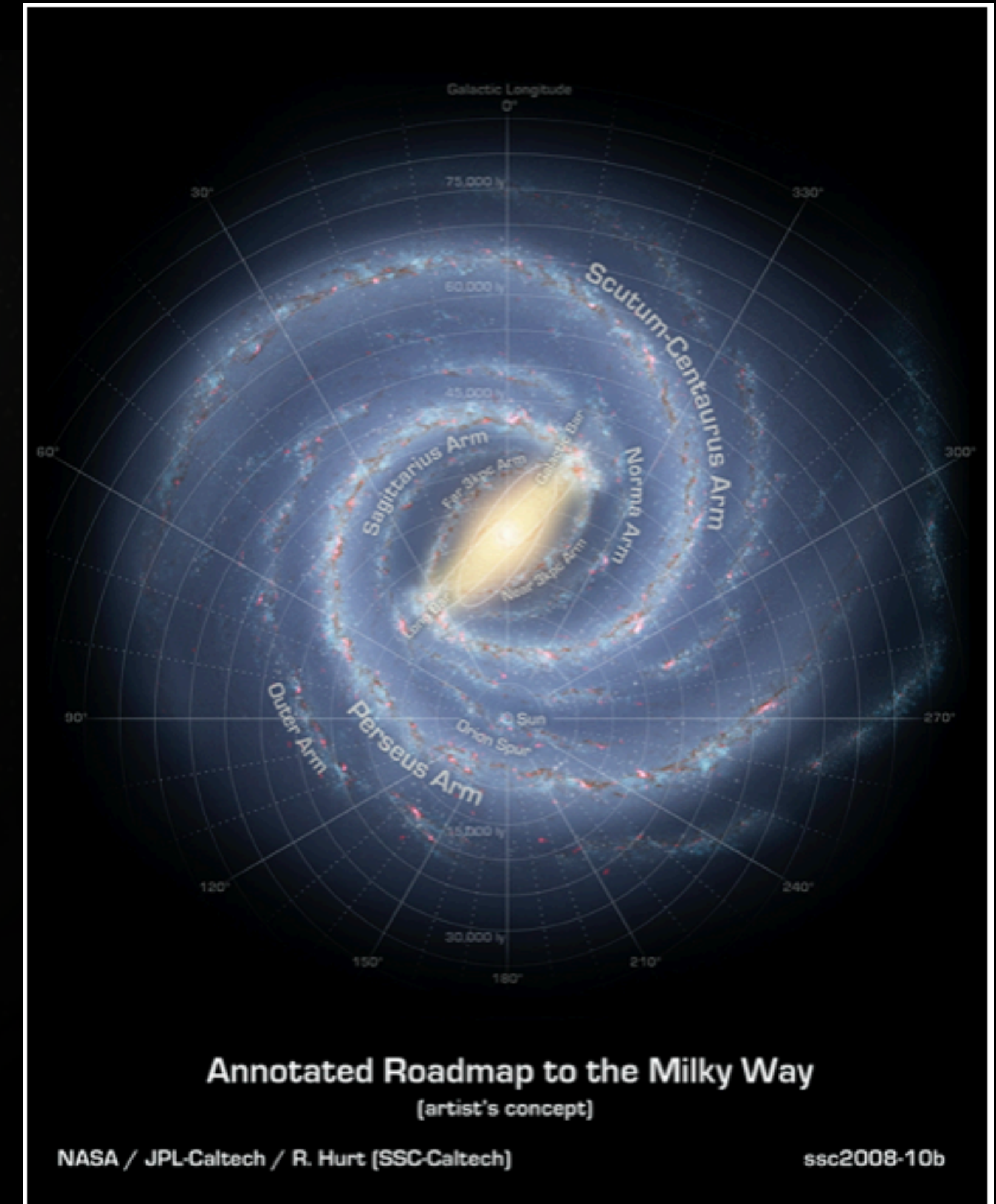
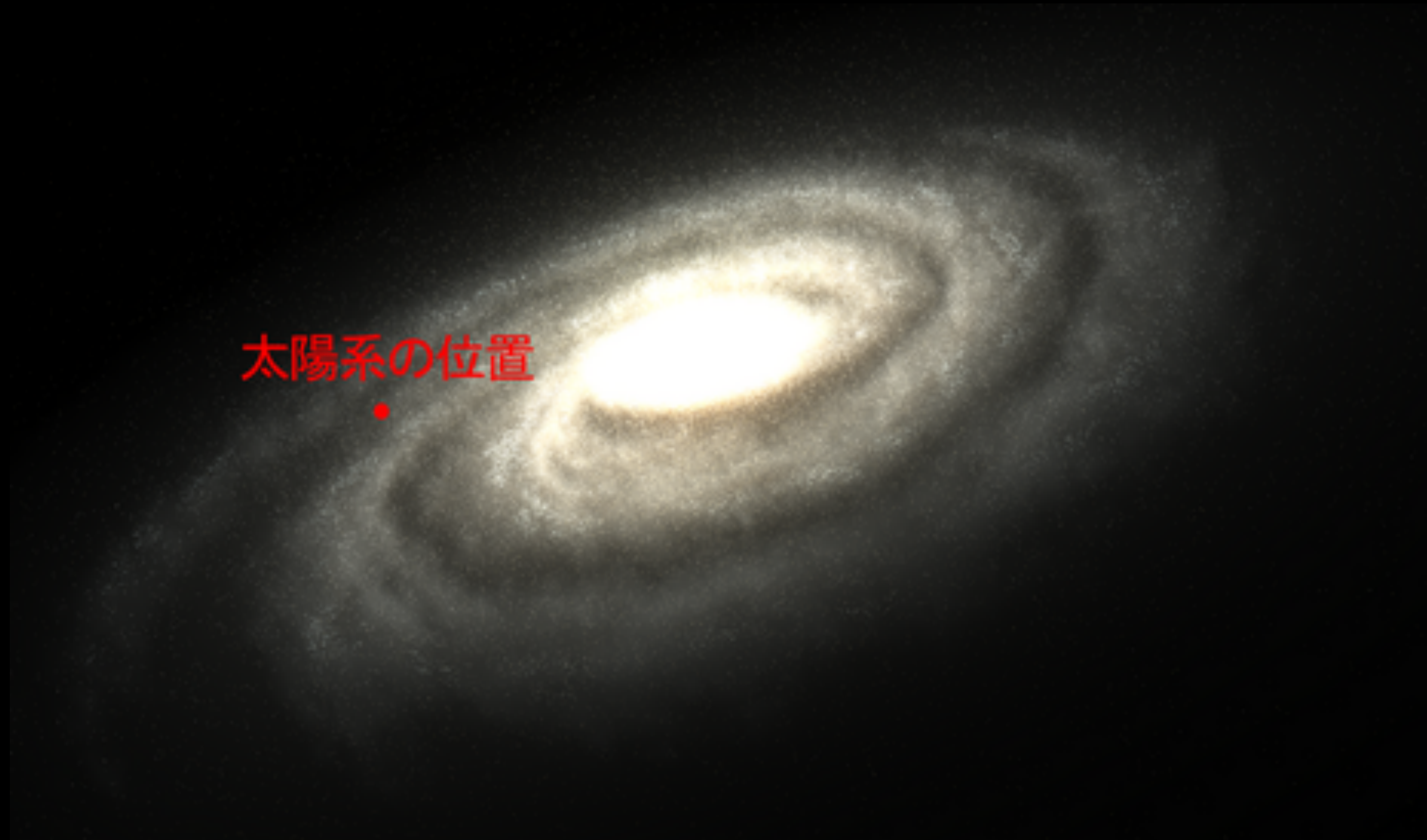
銀河中心からジェットが吹き出す  
(活動銀河核 active galactic nuclei)  
すべてのガスが吸い込まれるわけではない  
軸方向にジェットが吹き出す



「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





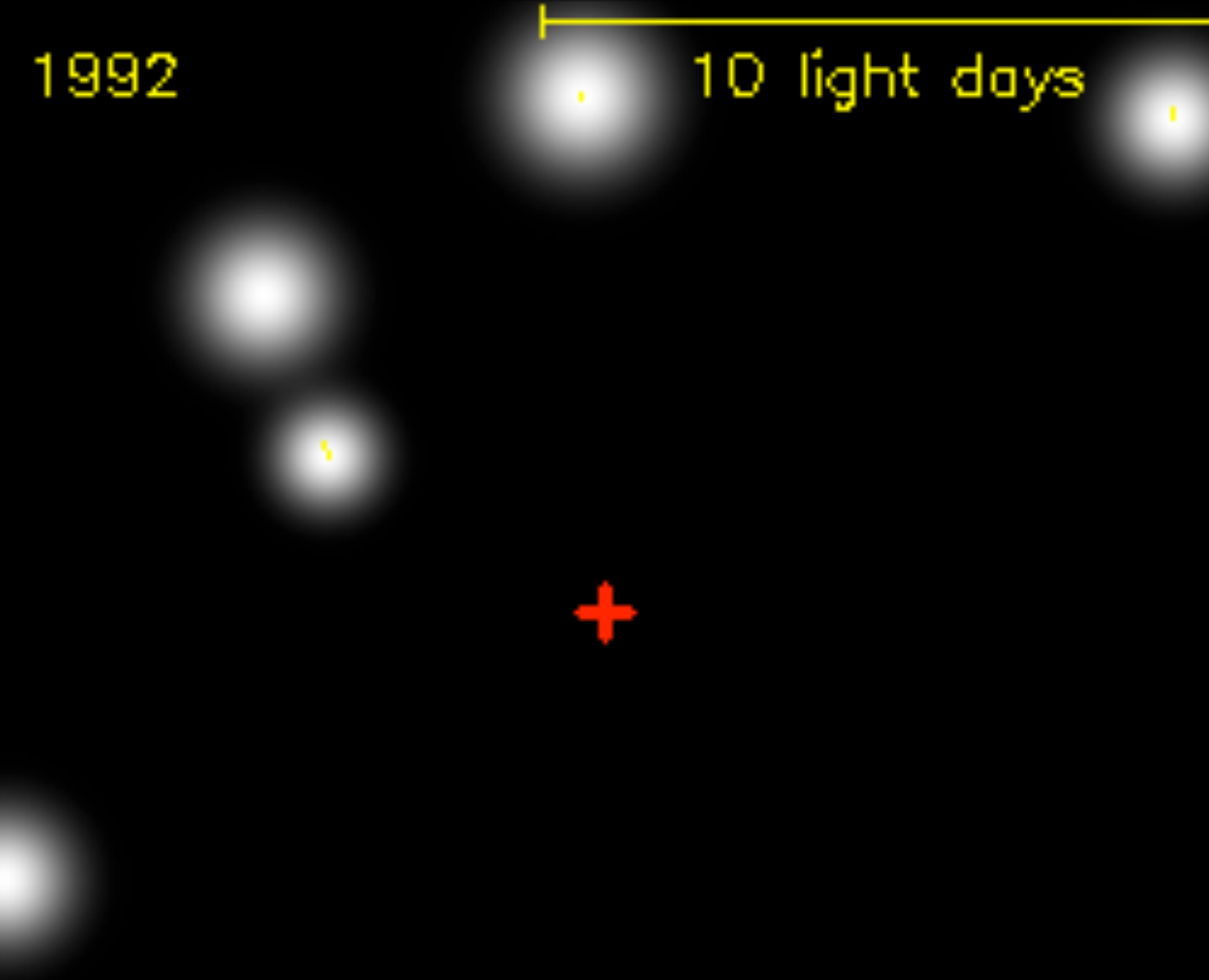
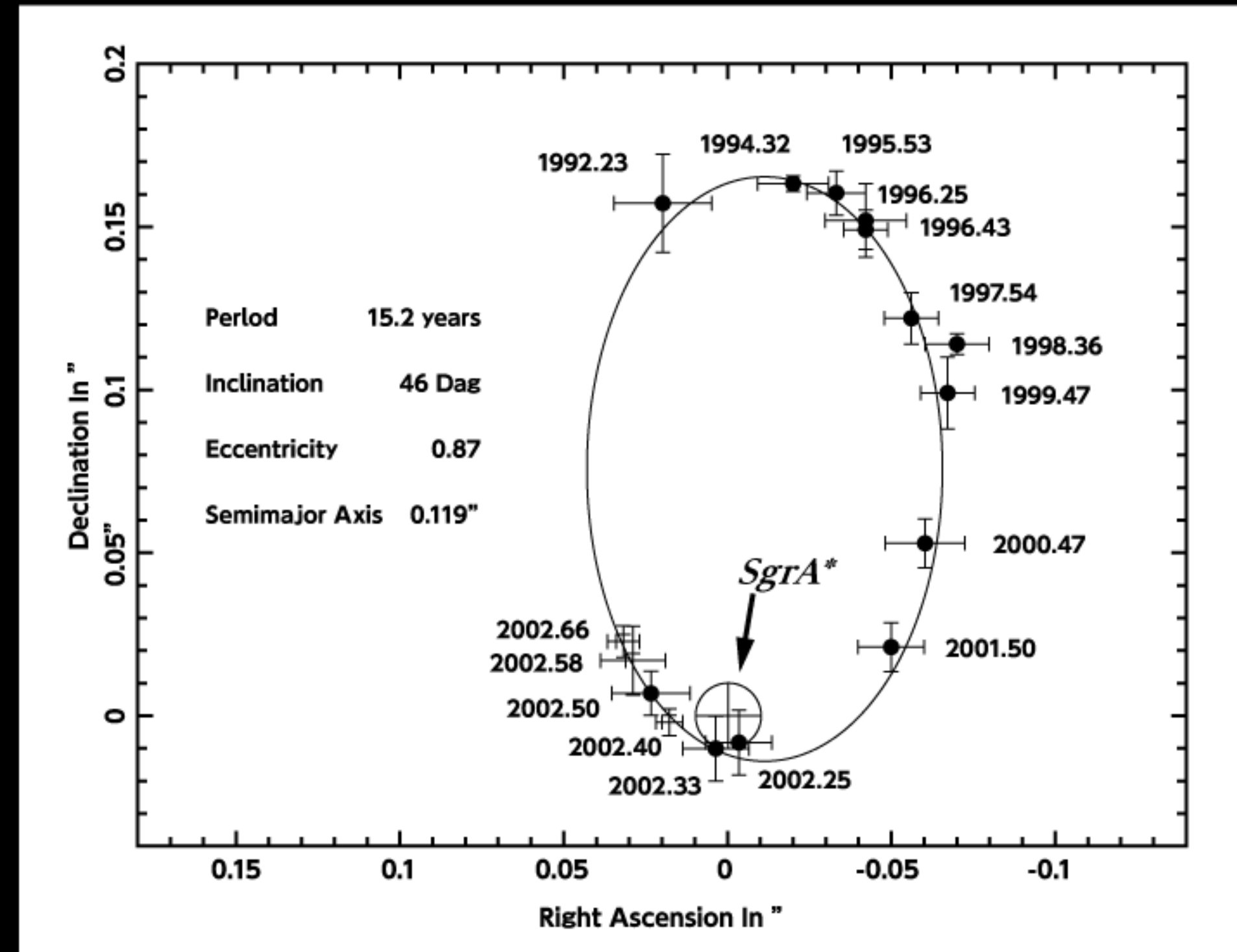


Zooming in on the centre of the Milky Way

<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」

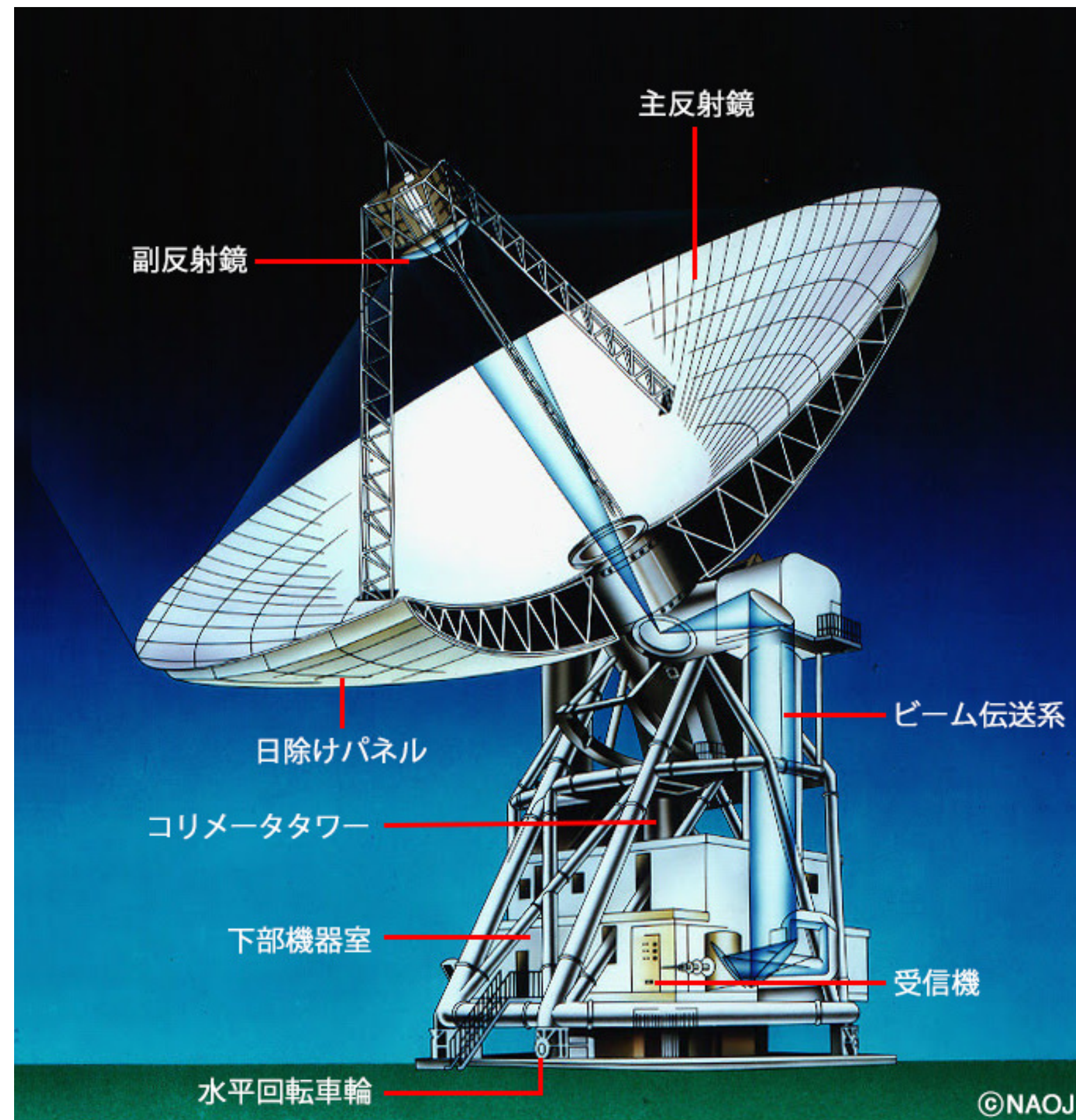


地球から5500万光年

<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



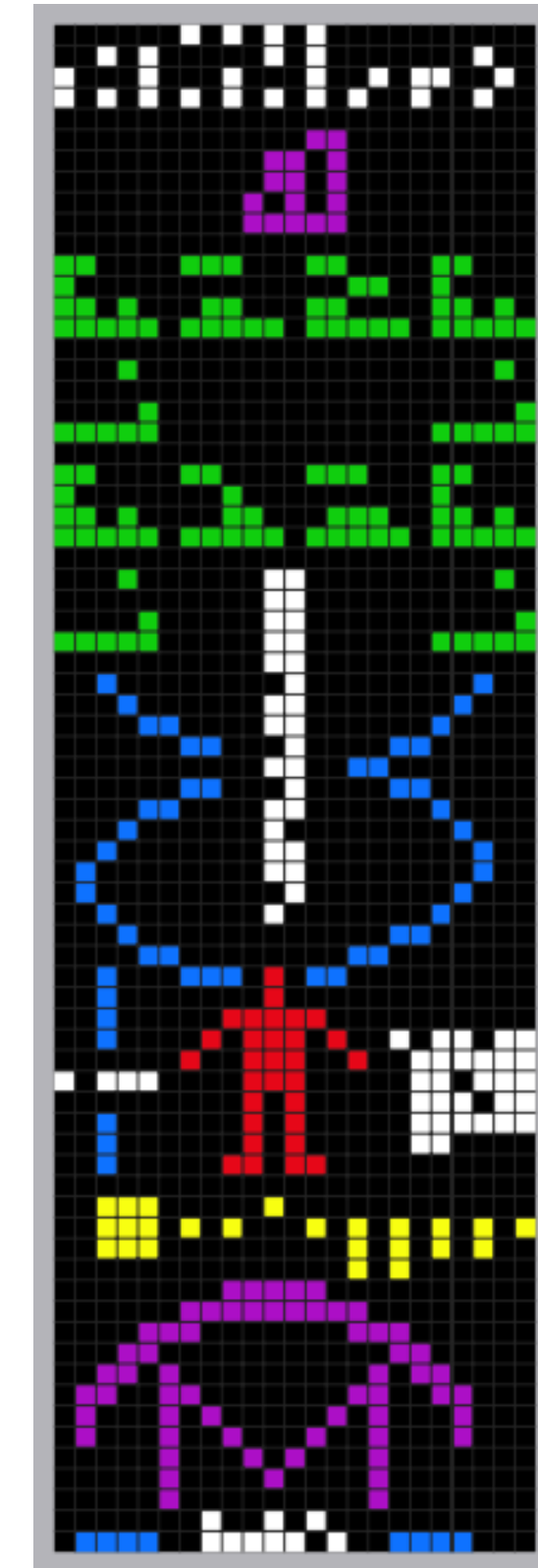
$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

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

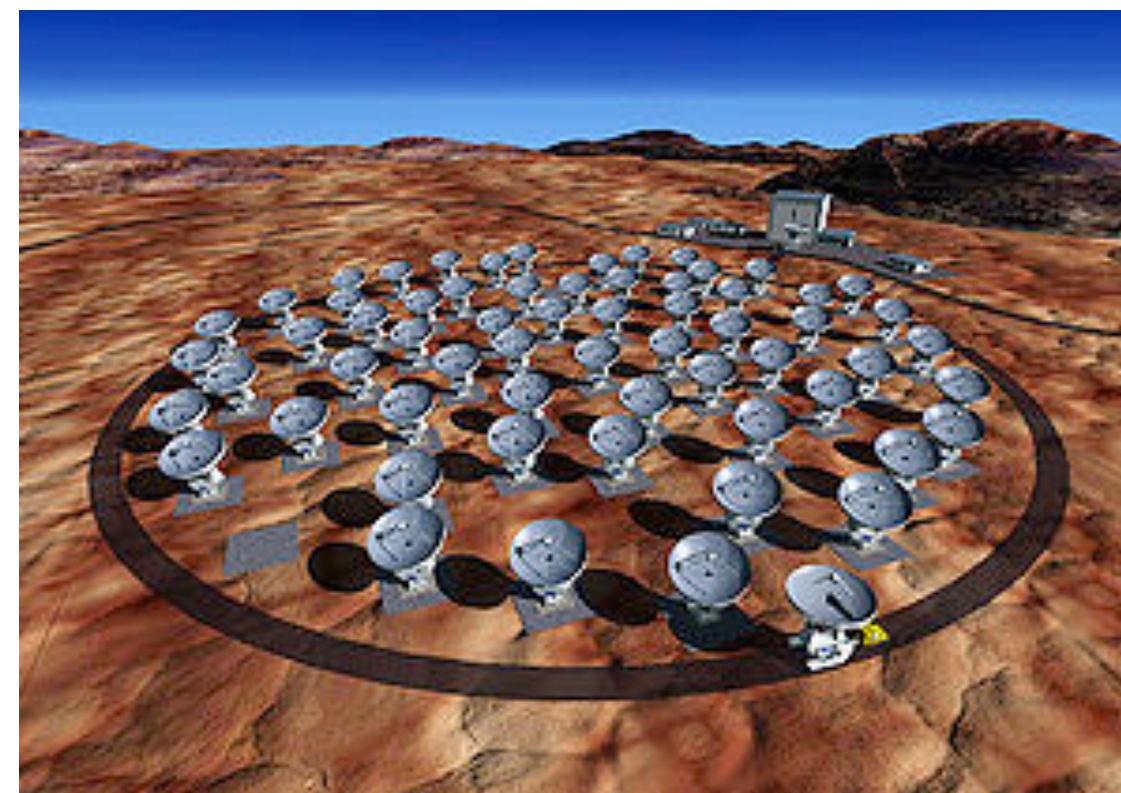
全66台のアンテナが設置され、日本は16台を担当。「いざよい」と命名。  
標高5000m地点に設置されている。

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」

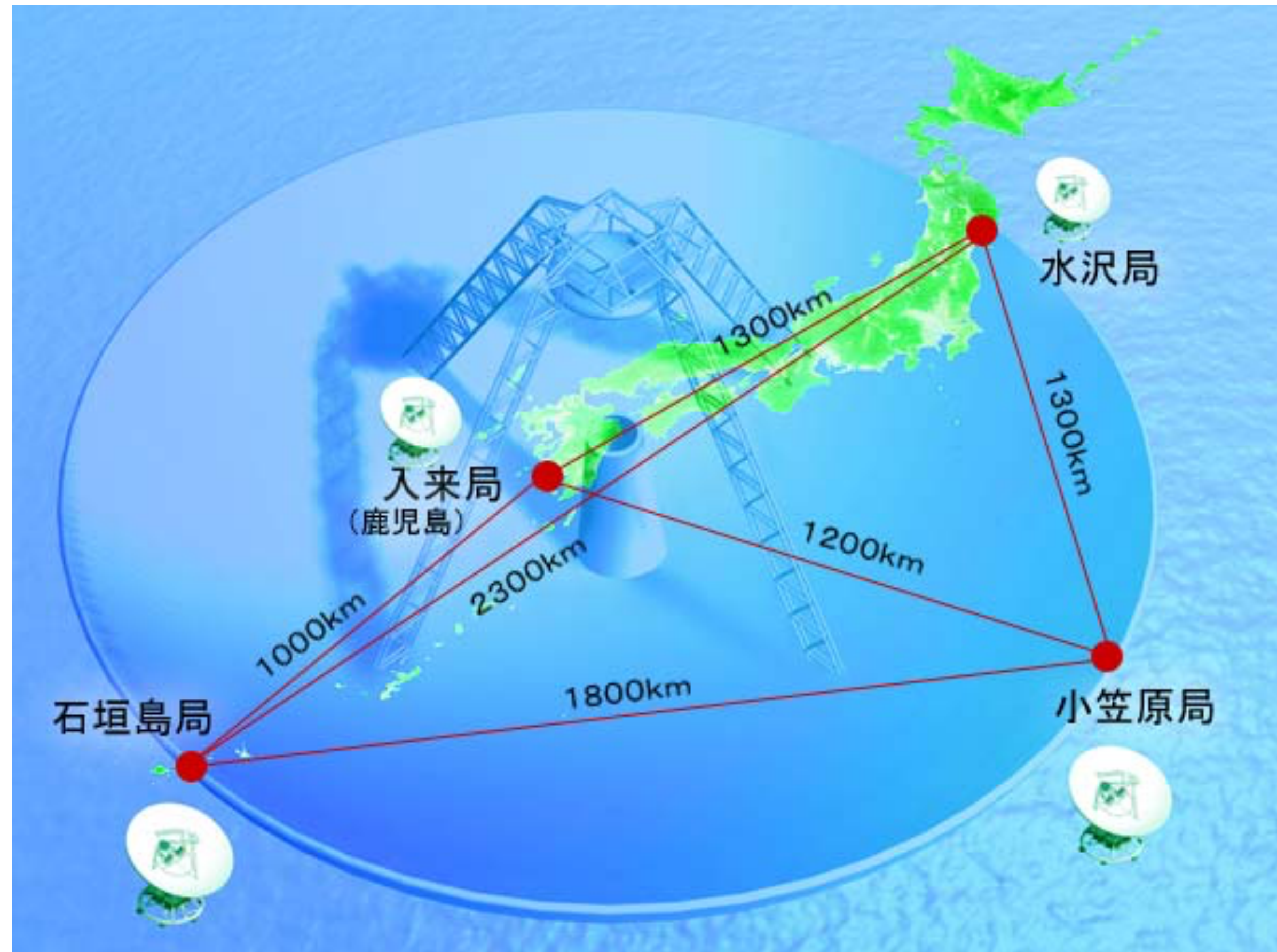




# 電波干渉計



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



<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」

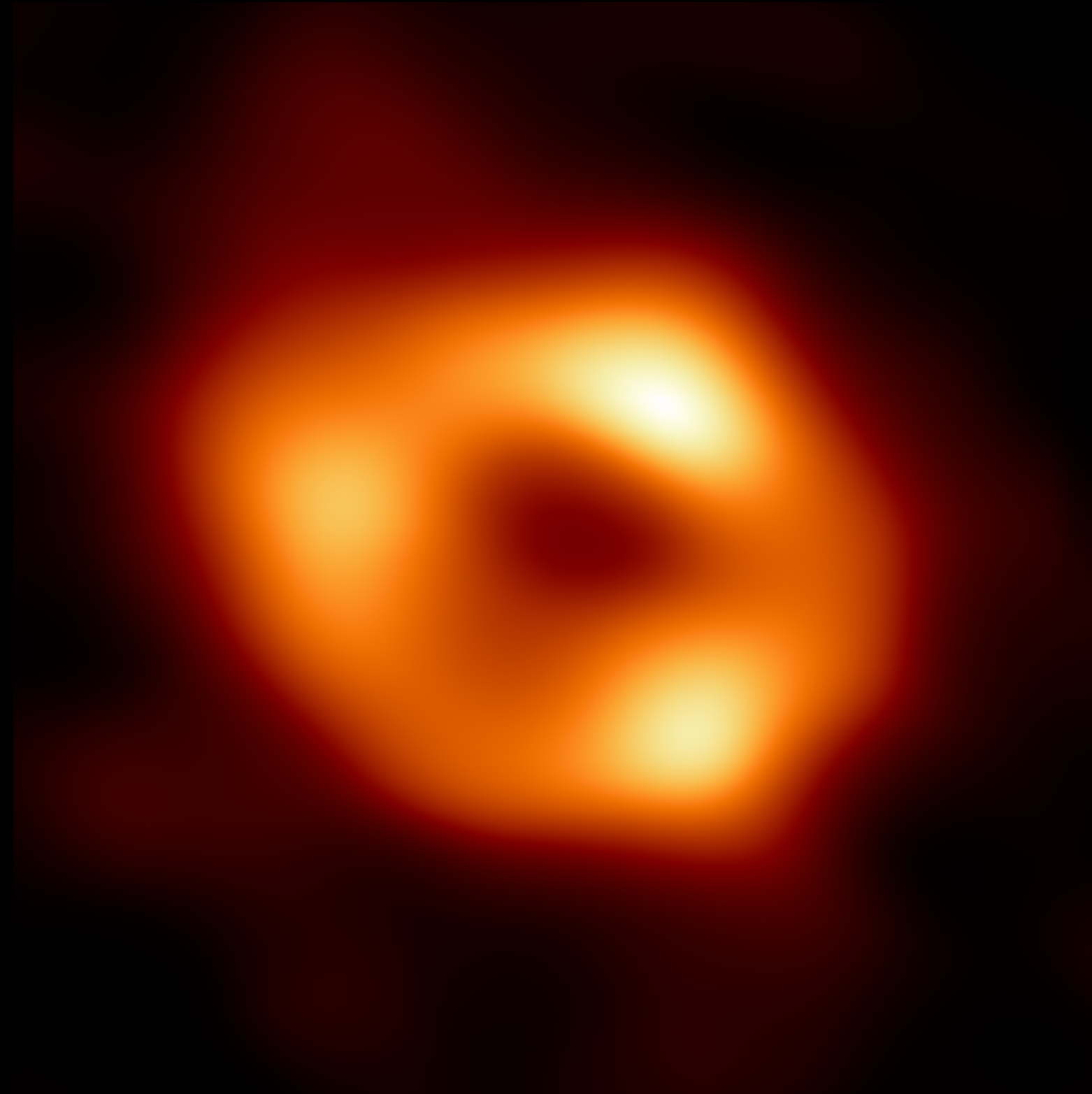


M87銀河（地球から5500万光年, 太陽質量の65億倍）

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）

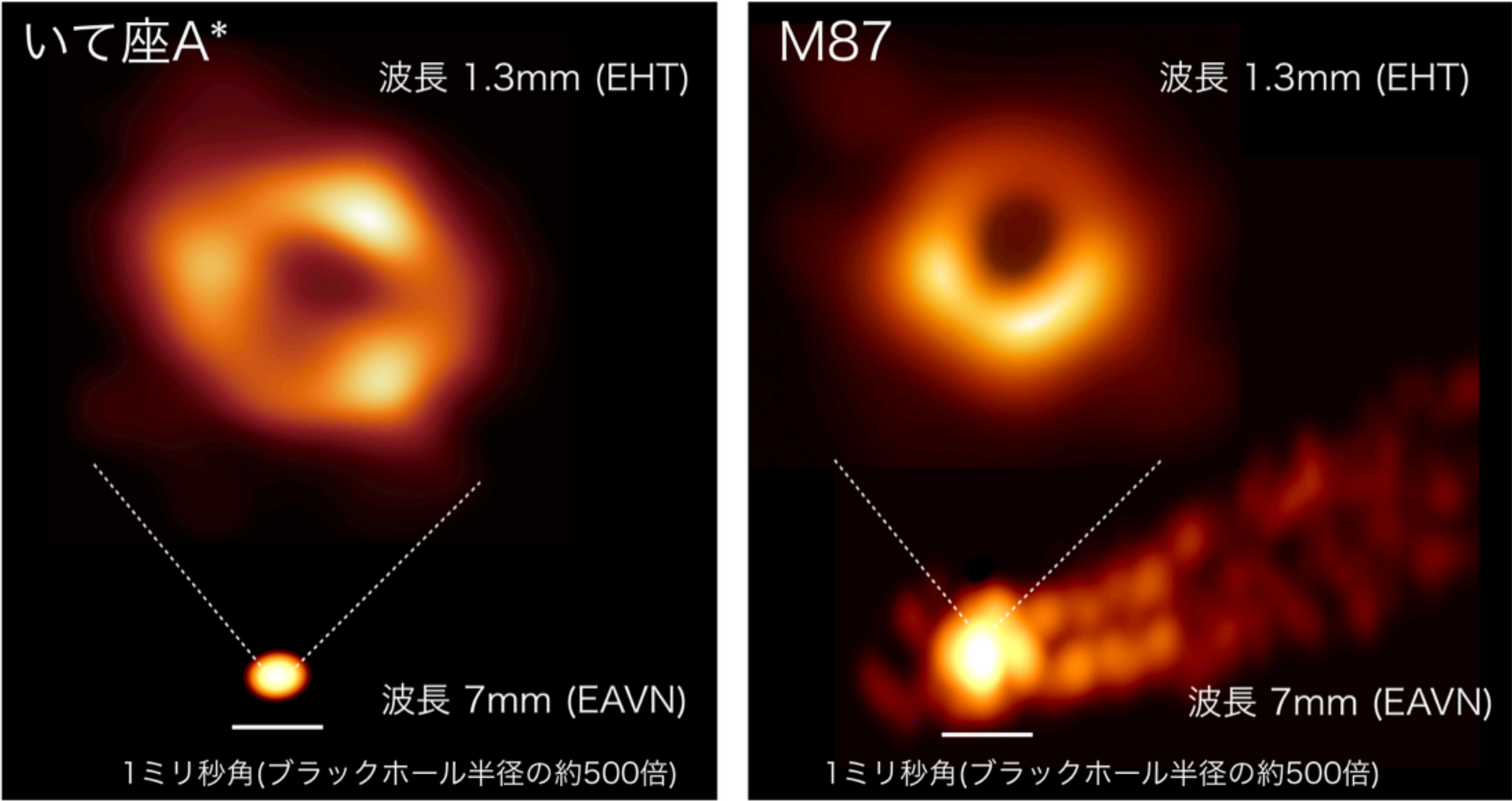
出典 Event Horizon Telescope HP



# 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」

| 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

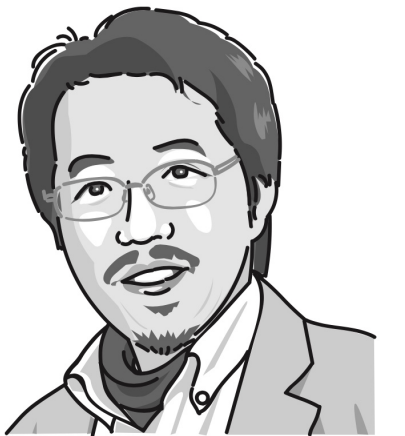


[図6] いて座A\* (左) とM87 (右) の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網 (EAVN) で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A\*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。(クレジット: EHT Collaboration, EAVN Collaboration)



# 相対性理論の検証の歴史と重力波天文学

真貝寿明(しんかいひさあき)  
大阪工業大学情報科学部

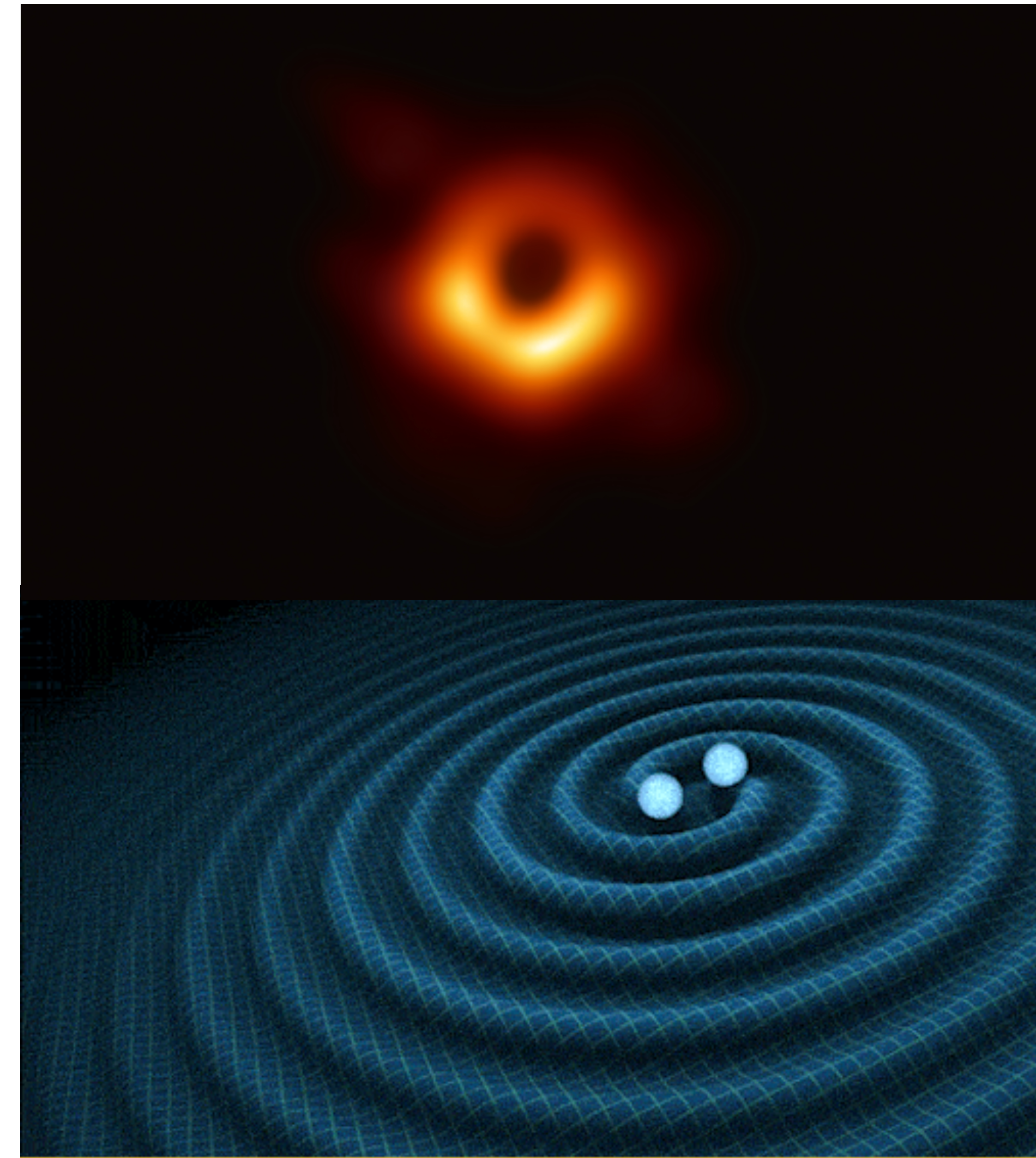


1. 相対性理論とは
2. ブラックホール
3. 相対性理論は正しいのか問題
4. 重力波

このスライドの取得先

[https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511\\_AsashiCulture.pdf](https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511_AsashiCulture.pdf)

202511 朝日カルチャー slide





## 映画『インターステラー』(2014)



ブラックホール近傍の星に着地した飛行士は仲間に  
「急げ, ここでの1時間は, 地球の7年になる」と発言.  
高さ4000ft (1200m)の津波が襲いかかる.

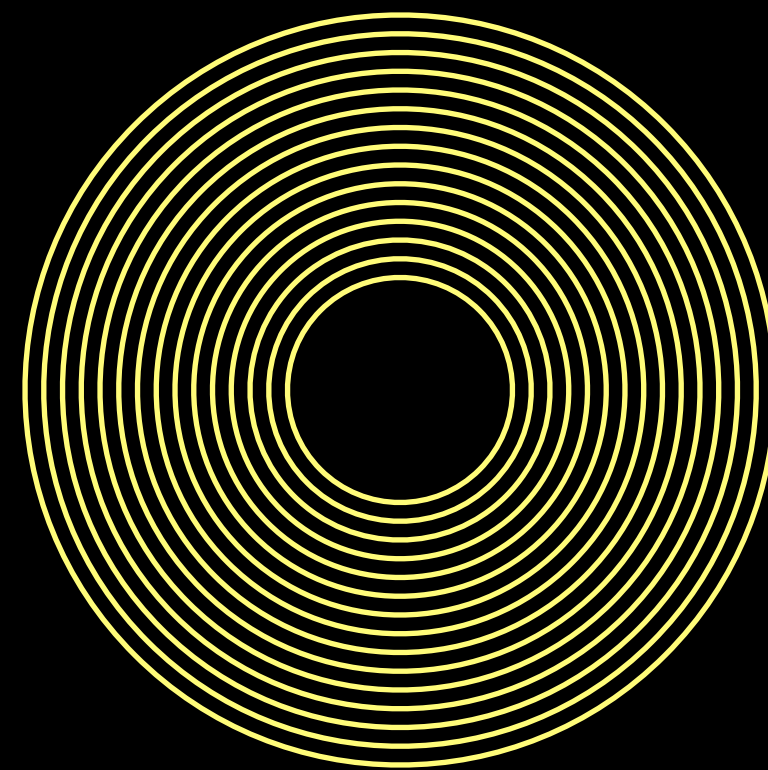


アインシュタインの  
一般相対性理論に基づいてる

物理学者キップ・ソーンが理論監修

強い重力場では時間の進み方は遅くなる

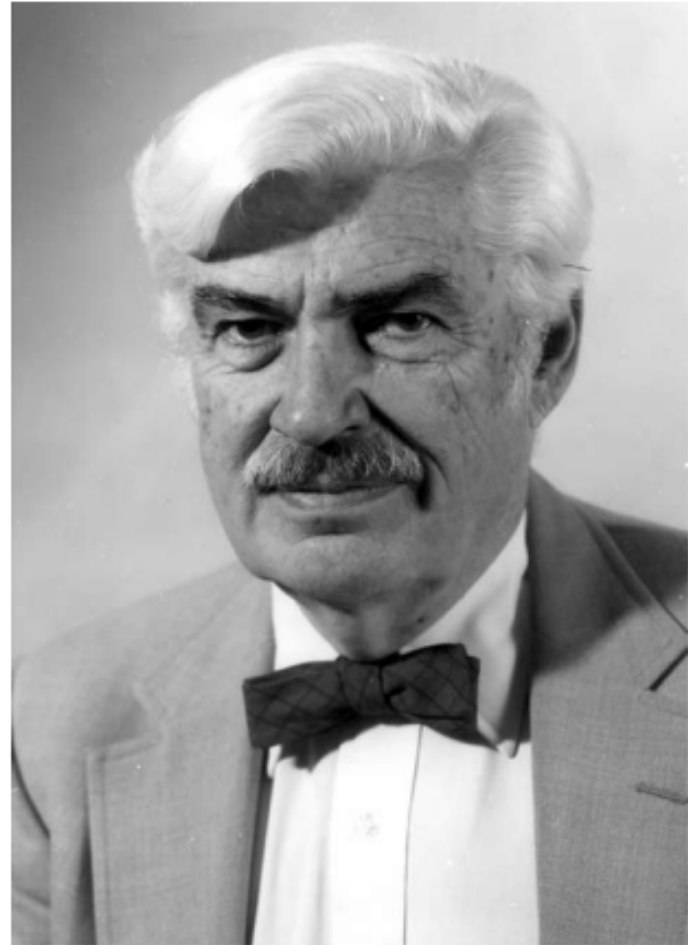




中心にあるブラックホールへ落ちていく宇宙ロケットが、  
同じ間隔でパルス光信号を周囲に放つときの光信号の伝播  
(光が次第にブラックホール近くから出てくるのに時間がかかる)



## Pound-Rebka 重力赤方偏移の確認 (1960)



*Robert V. Pound*

Robert V. Pound  
(1919-2010)

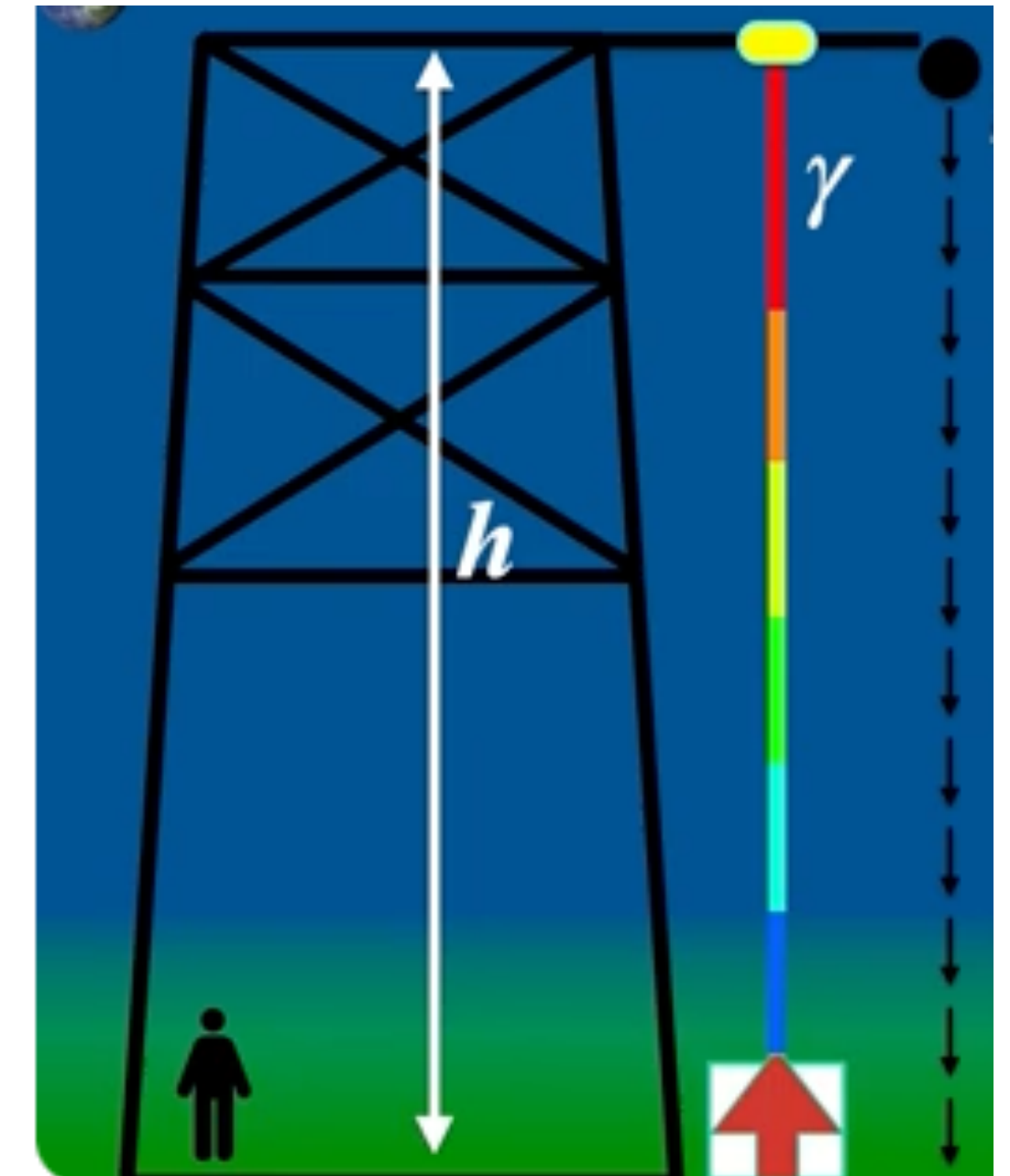


Glen A. Rebka  
(1931-2015)



重力の位置エネルギーによって、光のエネルギーが変わる  
上の階から放出した光は下の階では青方偏移、  
下の階から放出した光は上の階では赤方偏移する

Fe57から放出されるガンマ線を22mの高度差で精密観測。  
放出時の反跳を避けるためメスバウアー効果を利用。



$$\frac{E_{\text{top}}}{E_{\text{bottom}}} = \frac{h\nu_{\text{top}}}{h\nu_{\text{bottom}}} = \frac{mc^2}{mc^2 + mgh} \approx 1 - \frac{gh}{c^2}$$
$$\nu_{\text{top}} \approx \left(1 - \frac{gh}{c^2}\right) \nu_{\text{bottom}}$$

等価原理を1%の精度で確認

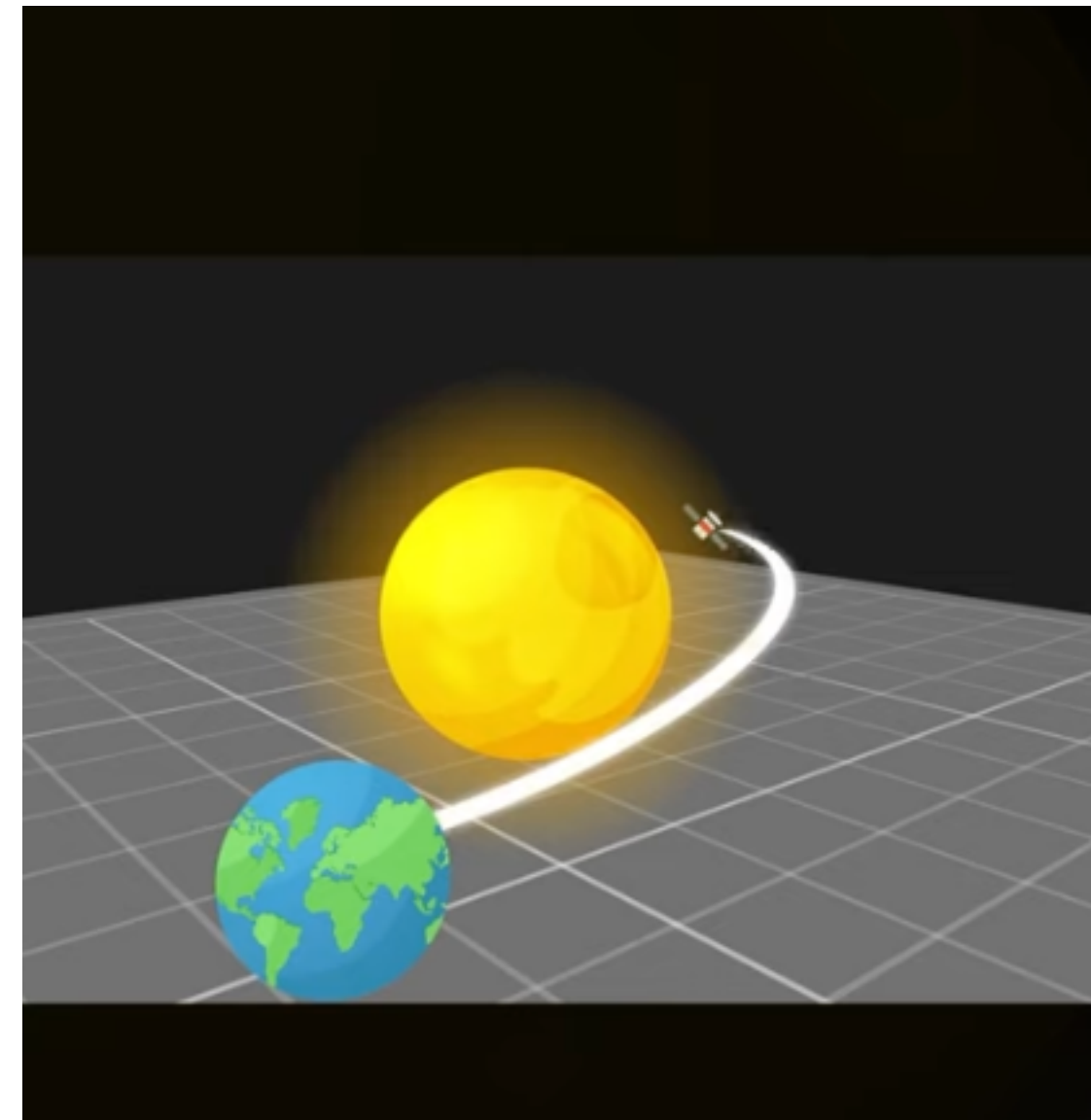


# Shapiro遅延 太陽付近のレーダー波の遅延 実験提案 (1964)+実験 (1966/67)



Irwin I. Shapiro  
(1929-)

太陽のような重力源の近くを通る信号(電波など)が、信号の往復時に重力によって引き起こされる遅延



MITが設置した  
30m電波アンテナ

太陽の向こう側に金星(1966/11/9), 水星(1967/1/18, 5/11, 8/24)が位置するときに地球からレーダーを放出して往復させる  
200  $\mu$ sec 程度の予想に対して, 20%精度で確認

重力レンズ効果+重力赤方偏移を20%の精度で確認

$d$  はレーダー波の太陽最接近距離,  $x_e$  は地球太陽距離,  $x_p$  は地球惑星距離,  
 $r_0 = GM_{\odot}/c^2$  は太陽の重力半径,

$$\Delta t \approx \frac{4r_0}{c} \left\{ \ln \left( \frac{4x_p x_e}{d^2} \right) - \left( \frac{3x_e + x_p}{2x_e} \right) \right\}$$



原子時計を積んで航空機で世界一周実験（1971）



Joseph C. Hafele (1933-2014)      Richard E. Keating (1941-2006)

セシウム原子時計を旅客機Boeing747に積んで世界一周  
2名+Mr. Clockで2シート分で合計7600ドル  
（最も安価な相対性理論検証実験, 8回発着）

|       | 重力による効果<br>(一般相対性理論) | 運動による効果<br>(特殊相対性理論) | 予測値合計    | 実験結果    | 差      |
|-------|----------------------|----------------------|----------|---------|--------|
| 東向き移動 | +144 ±14             | -184 ±18             | -40 ±23  | -59 ±10 | 0.76 σ |
| 西向き移動 | +179 ±18             | +96 ±10              | +275 ±21 | +273 ±7 | 0.09 σ |

単位はナノ秒      理論予測を1.6%の誤差で確認

\*1996年, National Physical Labが再実験. 大西洋横断, 予測値 39.8 nsに対して実測値 39±2 ns  
\*2010年, National Physical Labが再実験. 世界一周, 予測値 246±3 nsに対して実測値 230±20 ns



# GPS（Global Positioning System）

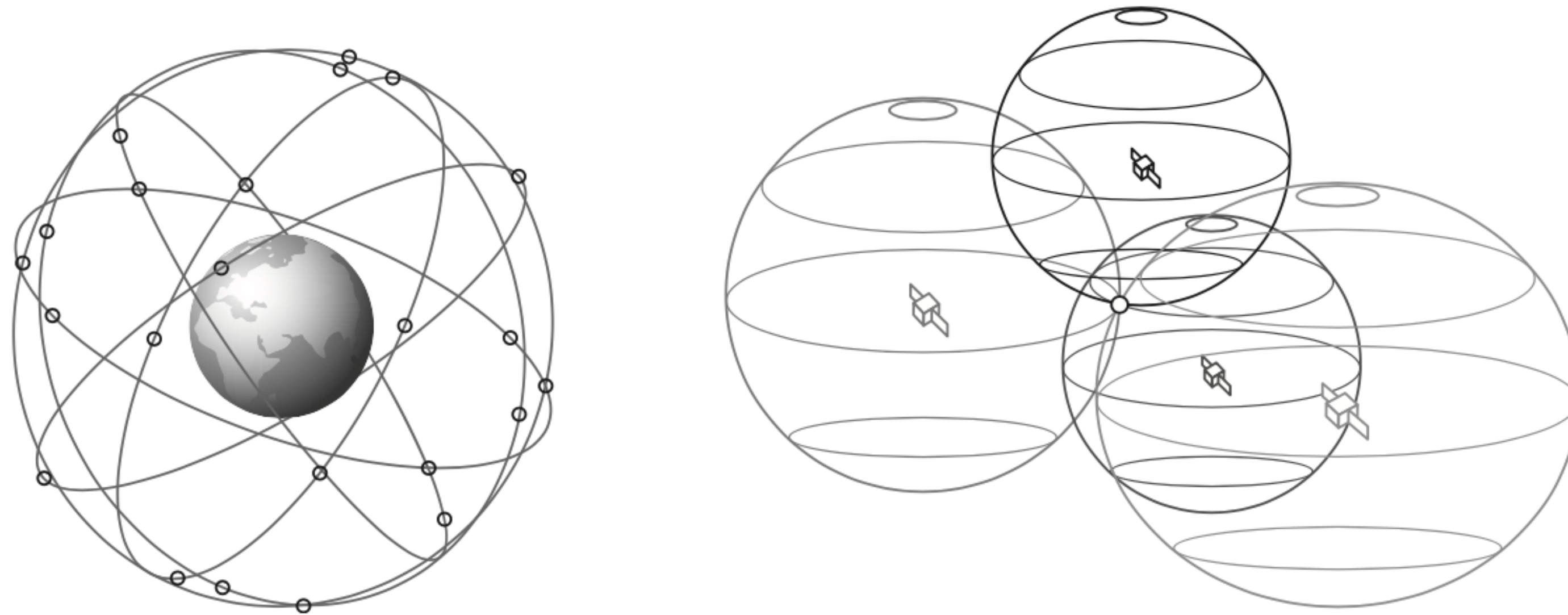


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で,

3角測量→精度 $\pm 15\text{m}$

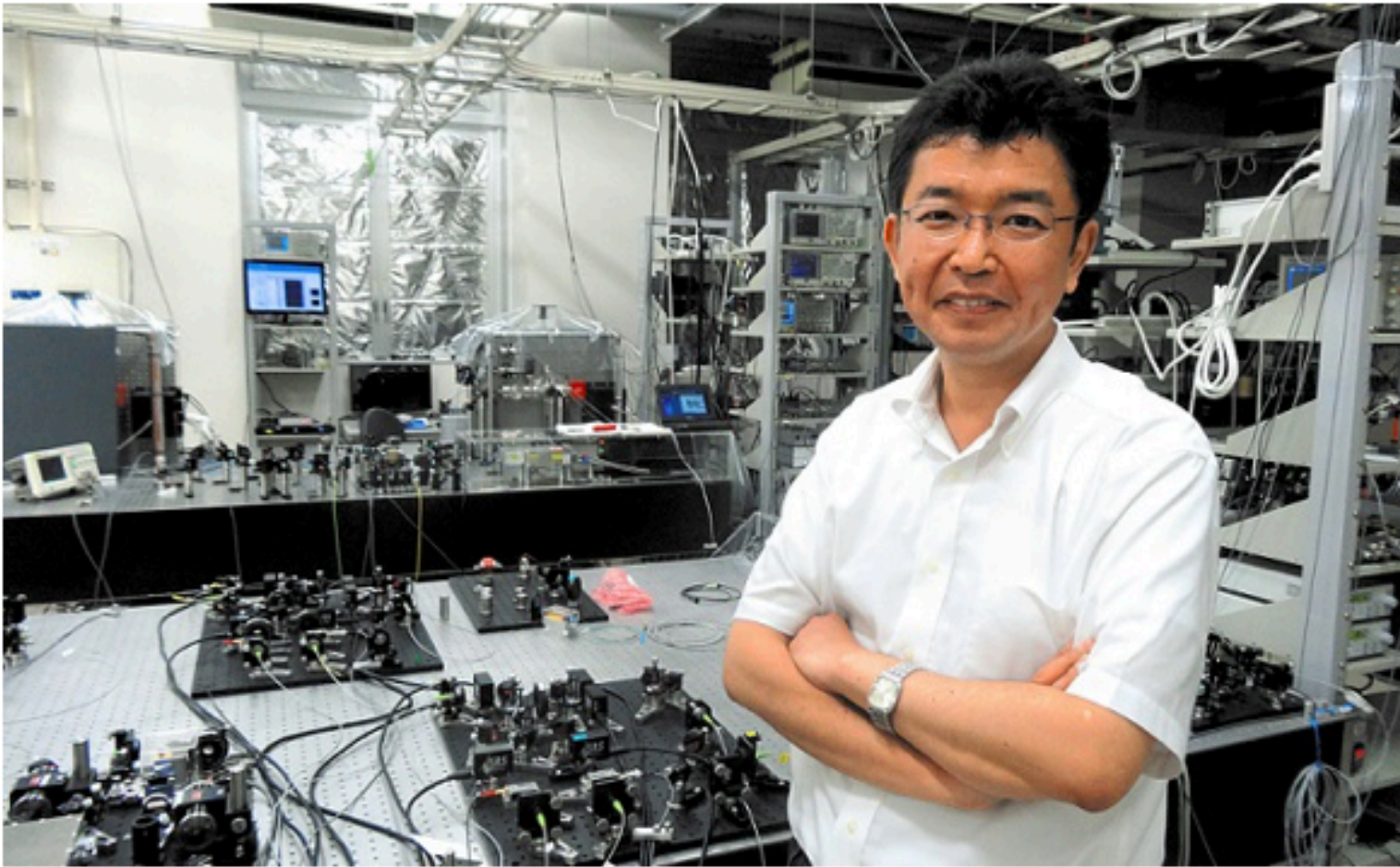
高速飛行の**特殊相対論効果**と

地球重力の**一般相対論効果**

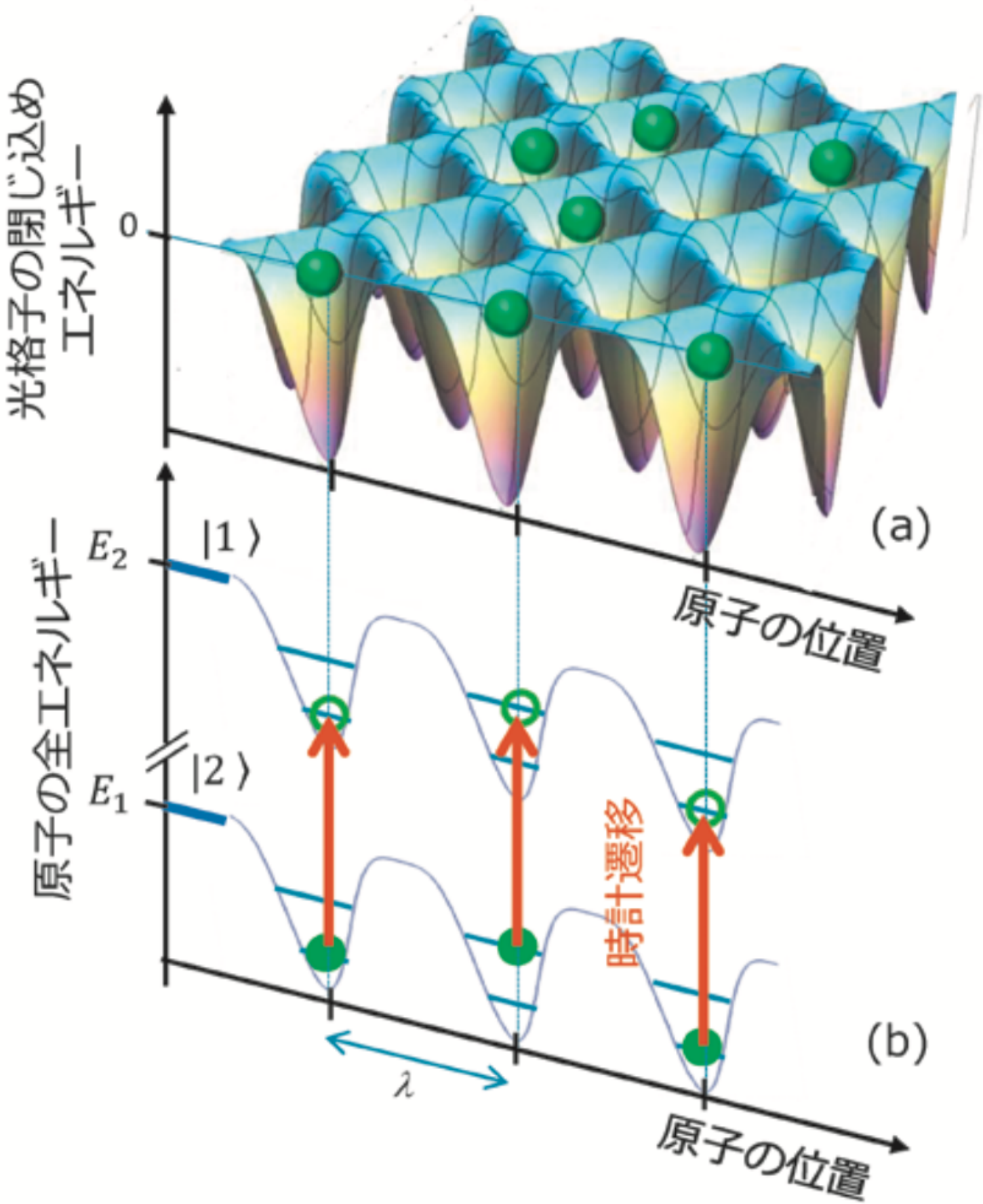
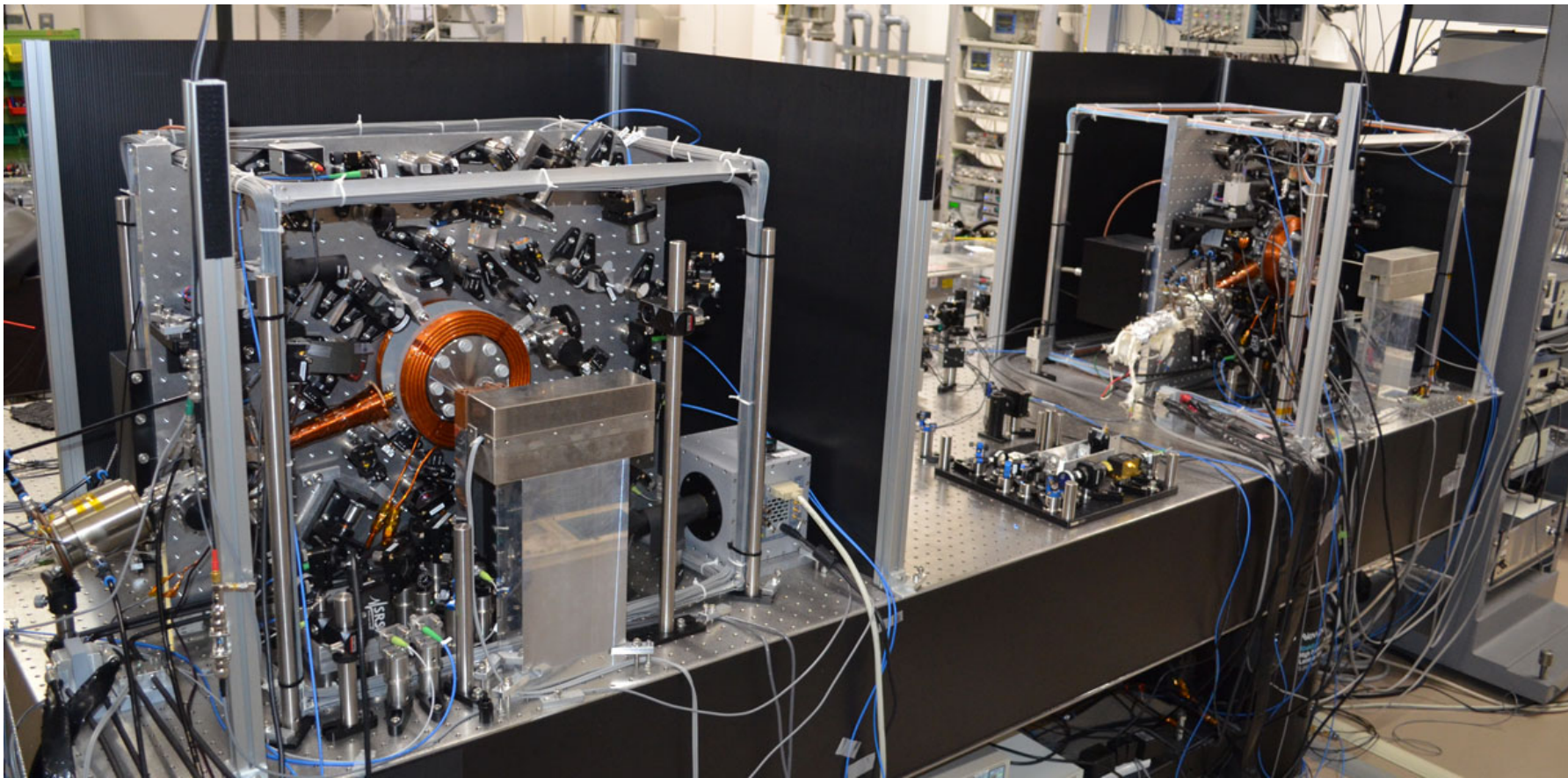
⇒1日につき,  $38 \times 10^{-6}$ 秒ずつ衛星の時計を遅らせる必要あり

一般相対性理論は正しい





光格子時計を開発した香取秀俊東京大学教授  
兼理化学研究所招聘主任研究員＝2013年7月  
31日、田中郁也撮影



10<sup>-18</sup> の精度を実現  
(300億年ですれは1秒以内)

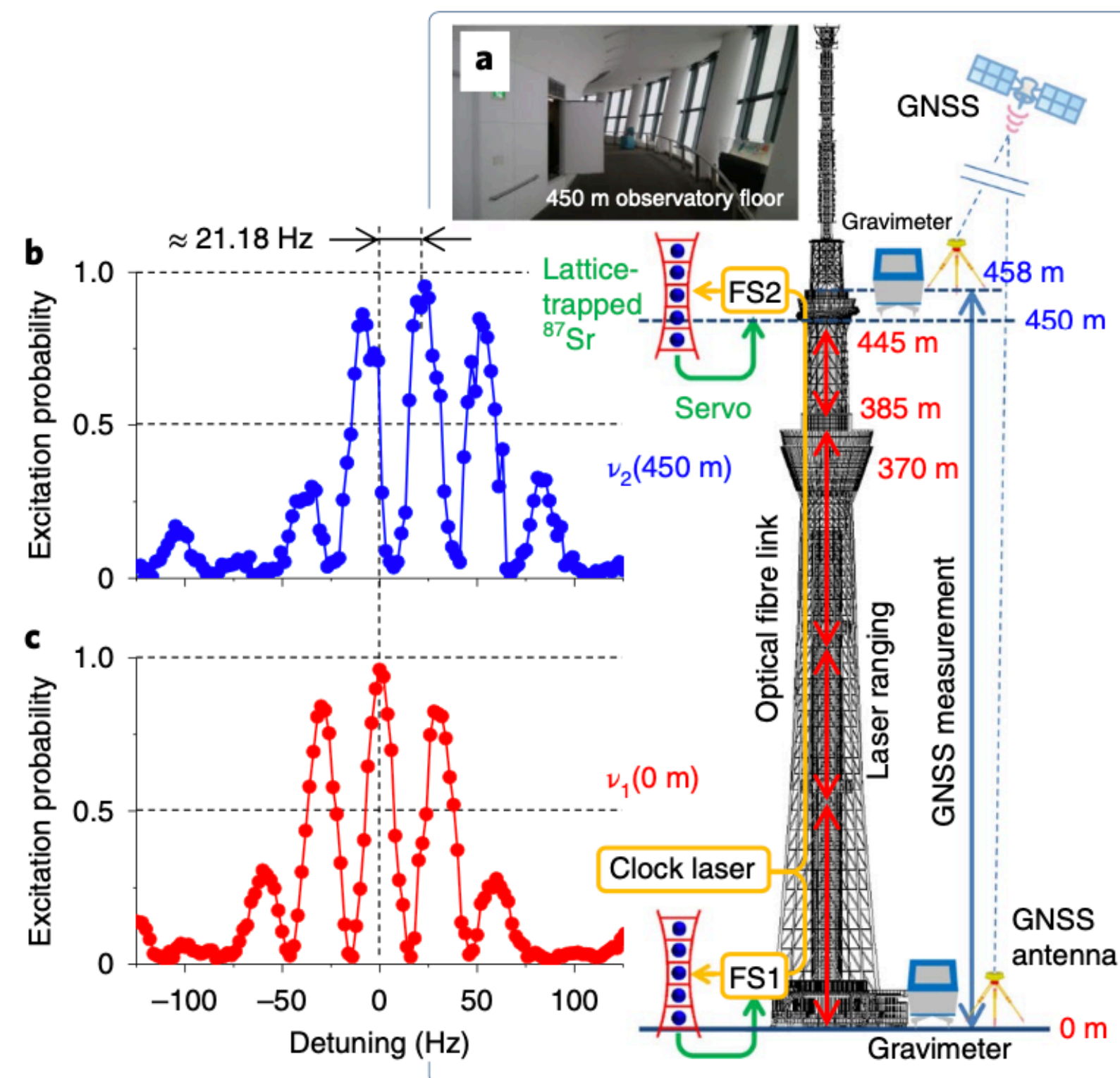


# スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

アインシュタインの相対性理論によれば、  
重力の強いところでは時間の進み方が遅くなる

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

図 6: 東京スカイツリーでの一般相対論検証実験の概要。地上階と展望台に設置した2台の可搬型光格子時計を光ファイバーでつなぎ、周波数比較を行った。一方、2台の時計の標高差を従来の測量手法（GNSS 測量およびレーザー測距）によって計測した。時計遷移を分光して得られたスペクトルでは、標高差 450 メートルに相当する約 21 ヘルツの周波数シフトが観測された。



1 週間の計測. 平均して, 差が

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (49337.8 \pm 4.3) \times 10^{-18}$$

$$\frac{g\Delta h}{c^2} = (49337.1 \pm 1.4) \times 10^{-18}$$

相対性理論の正しさを

$$(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$$

の精度で検証したことになる

nature  
photonics

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8>

Check for updates

Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks

Masao Takamoto<sup>1,2</sup>, Ichiro Ushijima<sup>3</sup>, Noriaki Ohmae<sup>1,2</sup>, Toshihiro Yahagi<sup>4</sup>, Kensuke Kokado<sup>4</sup>, Hisaaki Shinkai<sup>5</sup> and Hidetoshi Katori<sup>1,2,3</sup>✉



# スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

アインシュタインの相対性理論によれば、  
重力の強いところでは時間の進み方が遅くなる

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

1 週間の計測. 平均して, 差が

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (49337.8 \pm 4.3) \times 10^{-18}$$

$$\frac{g\Delta h}{c^2} = (49337.1 \pm 1.4) \times 10^{-18}$$

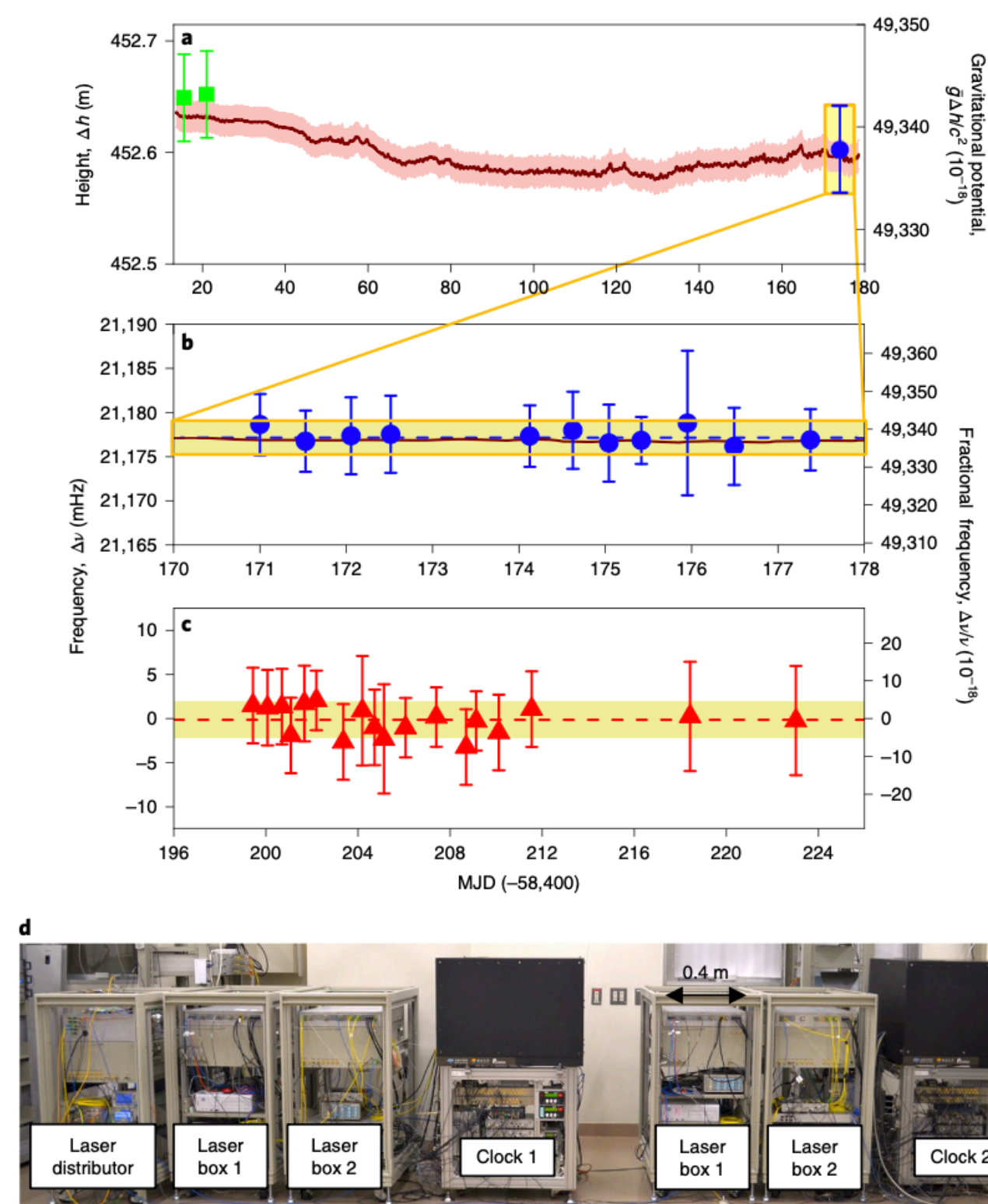
相対性理論の正しさを

$$(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$$

の精度で検証したことになる

LETTERS

NATURE PHOTONICS



**Fig. 3 | Height and frequency differences between two clocks.** **a**, Height differences  $\Delta h$  between the clocks are measured by GNSS (green squares), laser ranging (brown line) and the beat note of the clocks (blue circle) after applying systematic corrections. The continuous laser ranging measures a height variation of  $\sim 5$  cm that corresponds to the seasonal change in the outer temperature ( $\sim 10^\circ\text{C}$ ) over six months. The red shaded region shows the uncertainties of height measurements by laser ranging. **b**, The gravitational redshift measured at Skytree (blue circles) is consistent with the gravitational potential difference measured by the laser ranging and gravity measurements (brown line). **c**, The beat note of two clocks set at the same height (red triangles) is consistent with zero. **d**, Photograph of the experimental setup.

nature  
photonics

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8>

Check for updates

## Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks

Masao Takamoto<sup>1,2</sup>, Ichiro Ushijima<sup>3</sup>, Noriaki Ohmae<sup>1,2</sup>, Toshihiro Yahagi<sup>4</sup>, Kensuke Kokado<sup>4</sup>, Hisaaki Shinkai<sup>5</sup> and Hidetoshi Katori<sup>1,2,3</sup> ✉



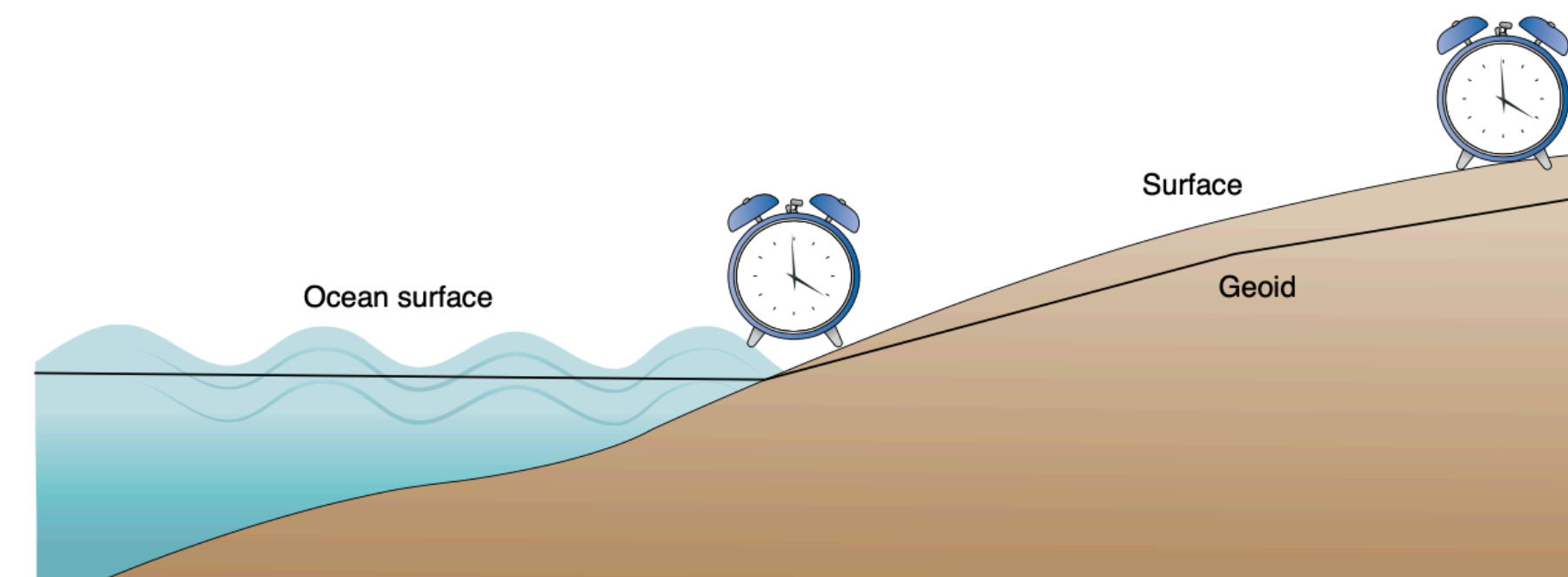
# スカイツリーの上下で時間の進み方が違う



Physics Today 2020 July

冷蔵庫サイズの時計で，高度差450mを  $\pm$ 数cm で測定できる.

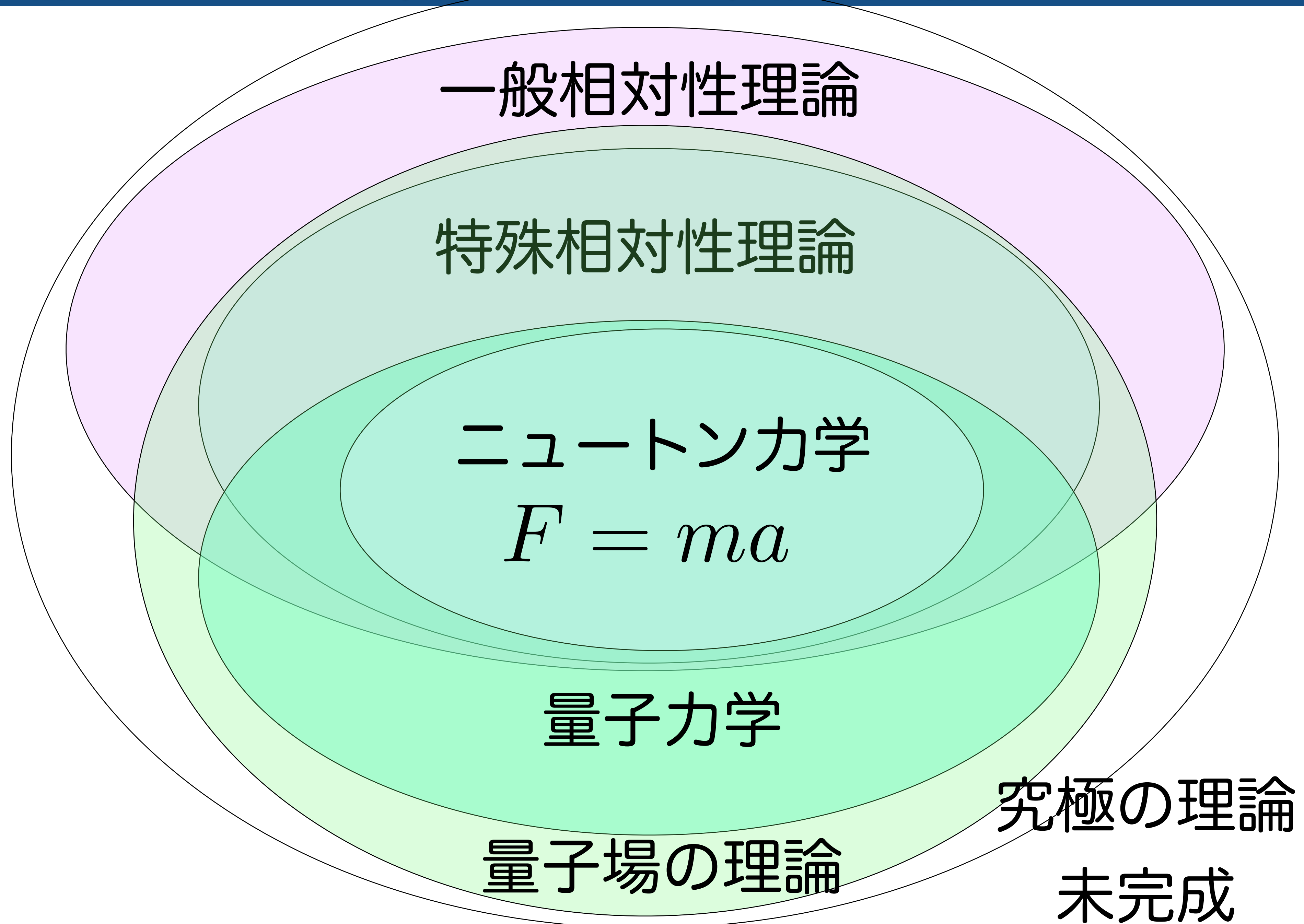
光格子時計の社会実装に向けた大きな一歩.  
今後，地殻変動や火山活動の監視など，相対論的測地技術の実用化が期待される.



**Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks.** The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ. Placing one clock at sea level and one at an inland location allows to determine the geoid height via a frequency comparison between the clocks.

K.Bongs & Y.Singh, Nature Photonics 14 (2020) 408

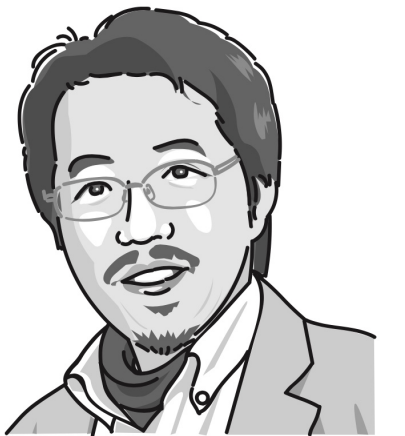






# 相対性理論の検証の歴史と重力波天文学

真貝寿明(しんかいひさあき)  
大阪工業大学情報科学部

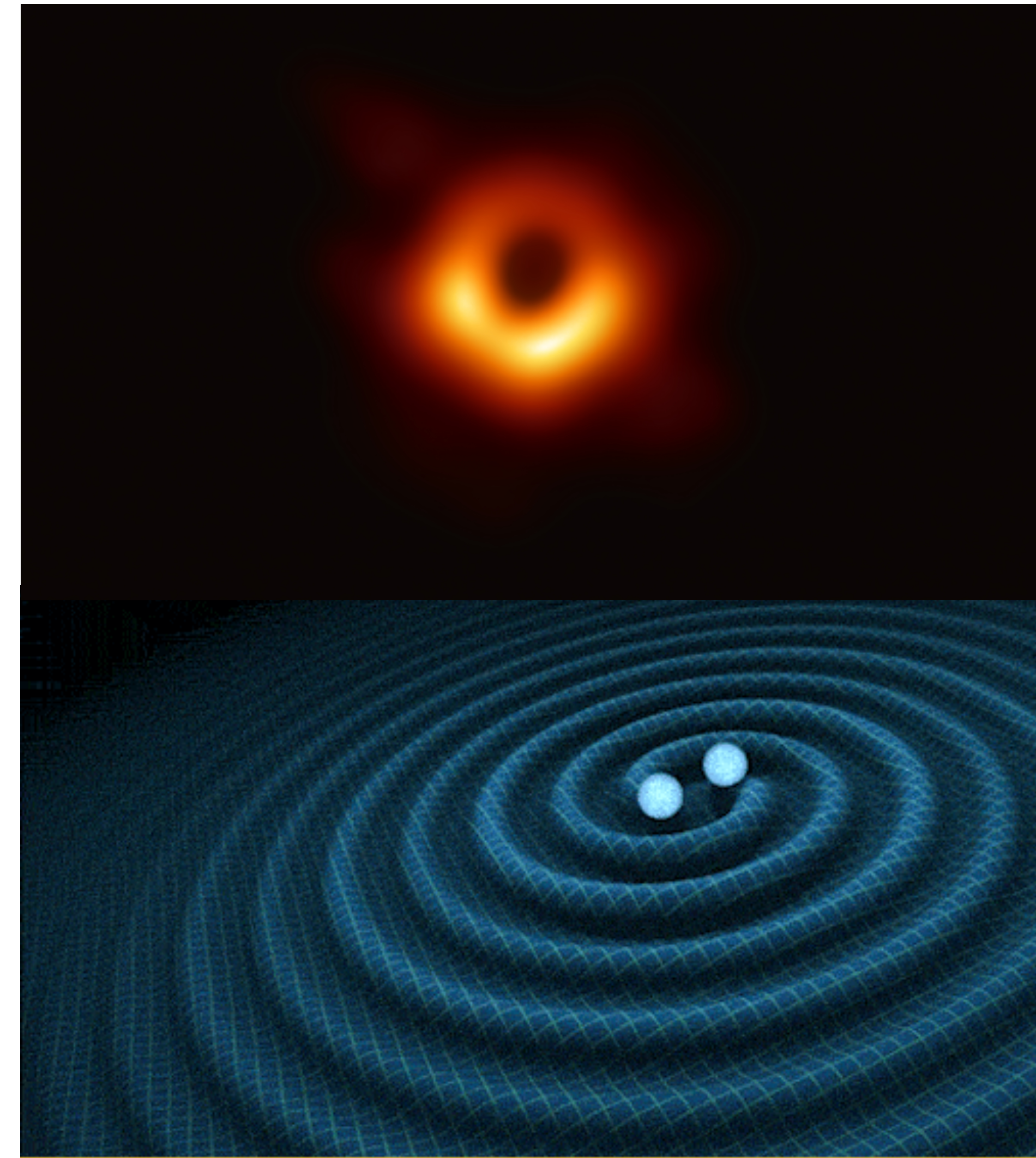


1. 相対性理論とは
2. ブラックホール
3. 相対性理論は正しいのか問題
4. 重力波

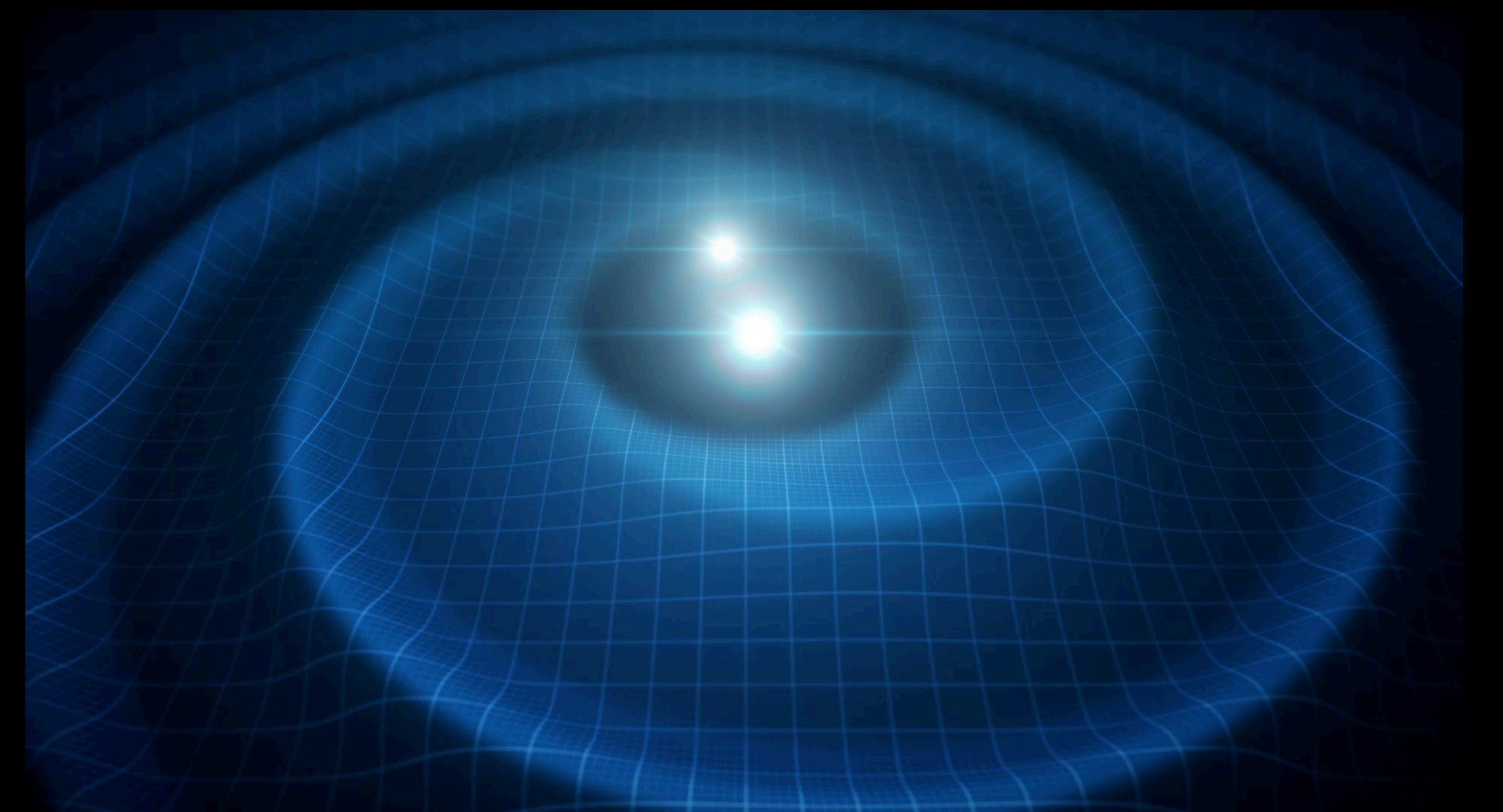
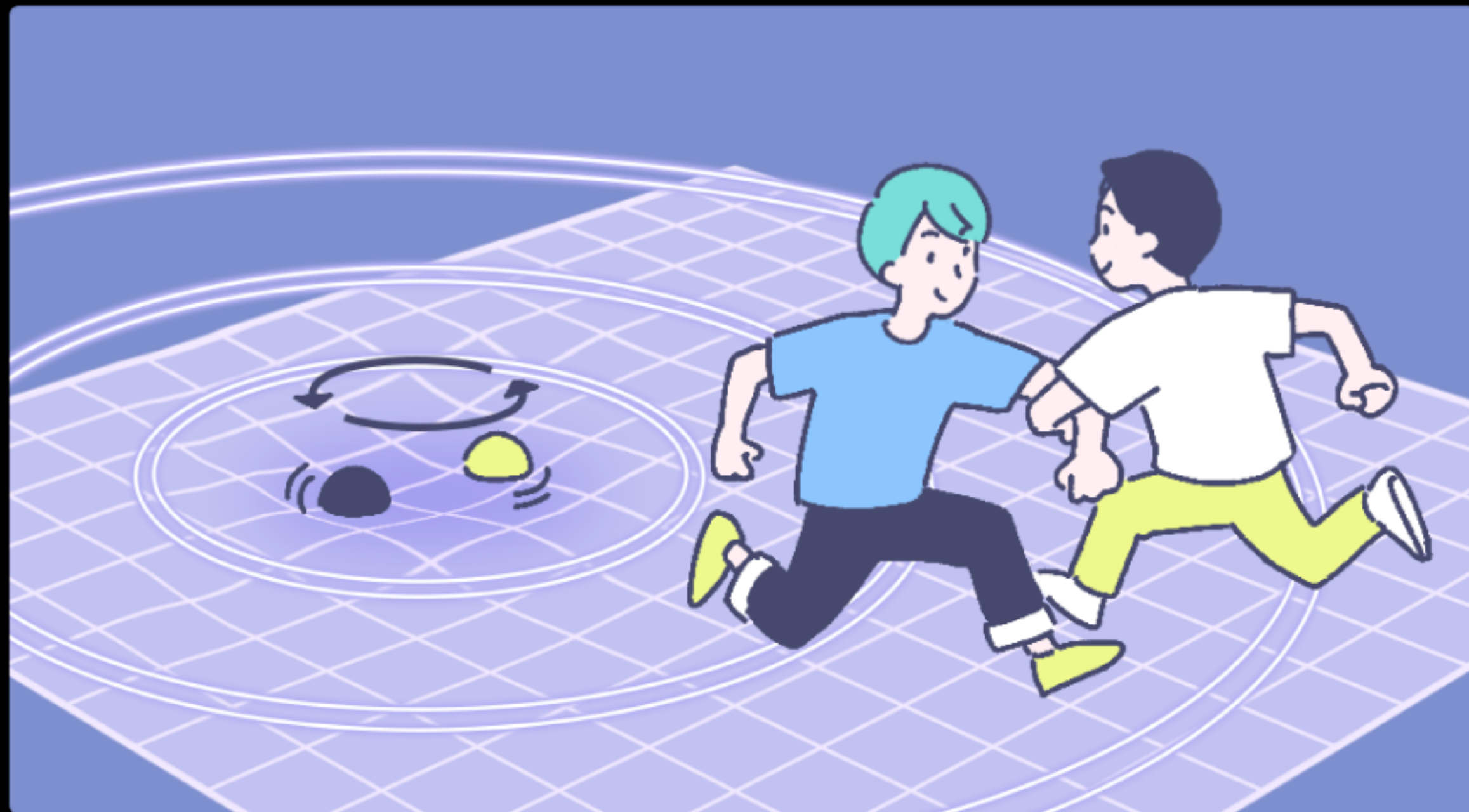
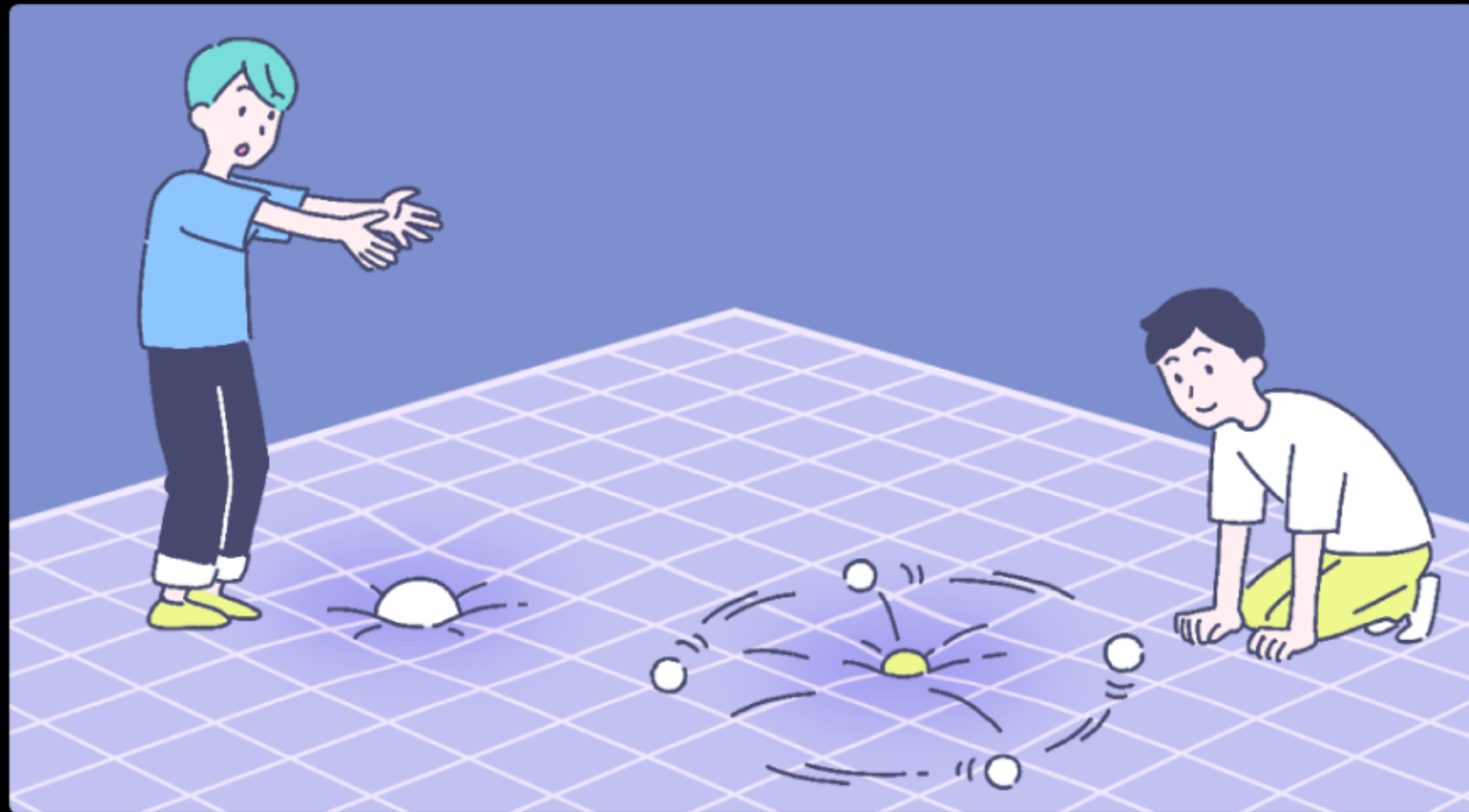
このスライドの取得先

[https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511\\_AsashiCulture.pdf](https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/Viewgraphs/202511_AsashiCulture.pdf)

202511 朝日カルチャー slide



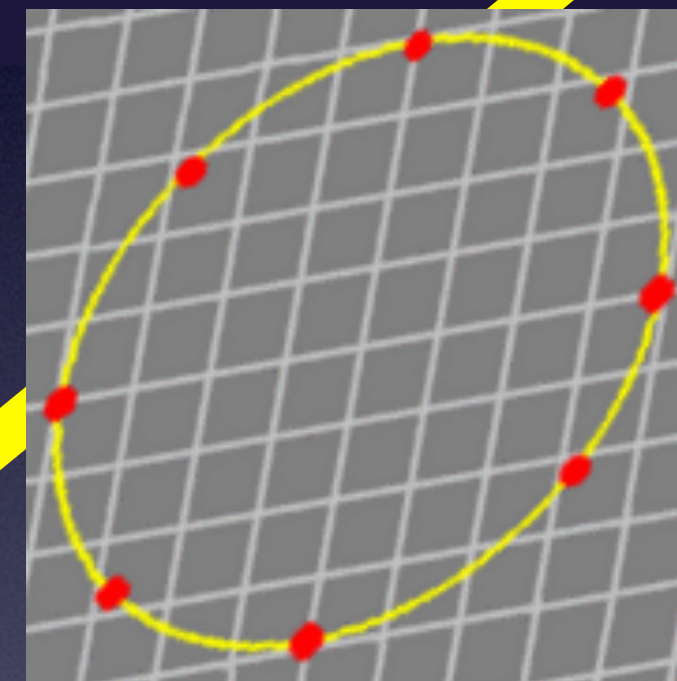
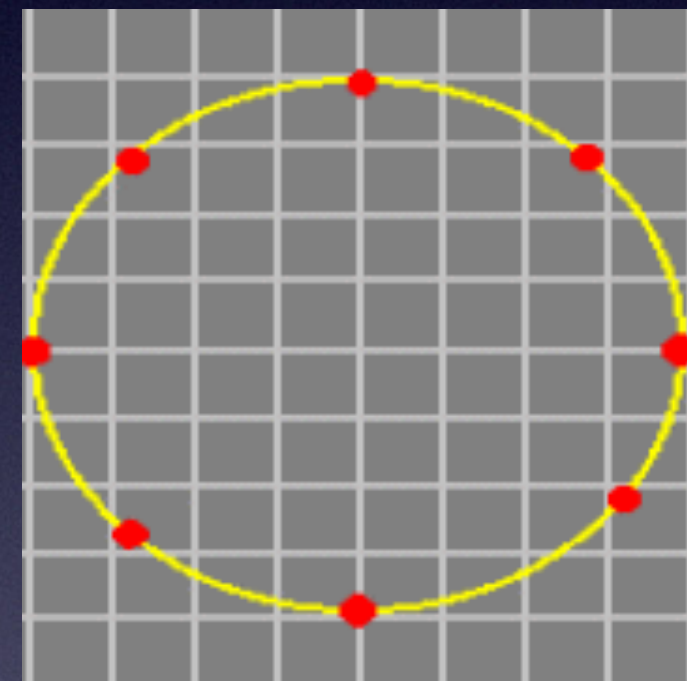
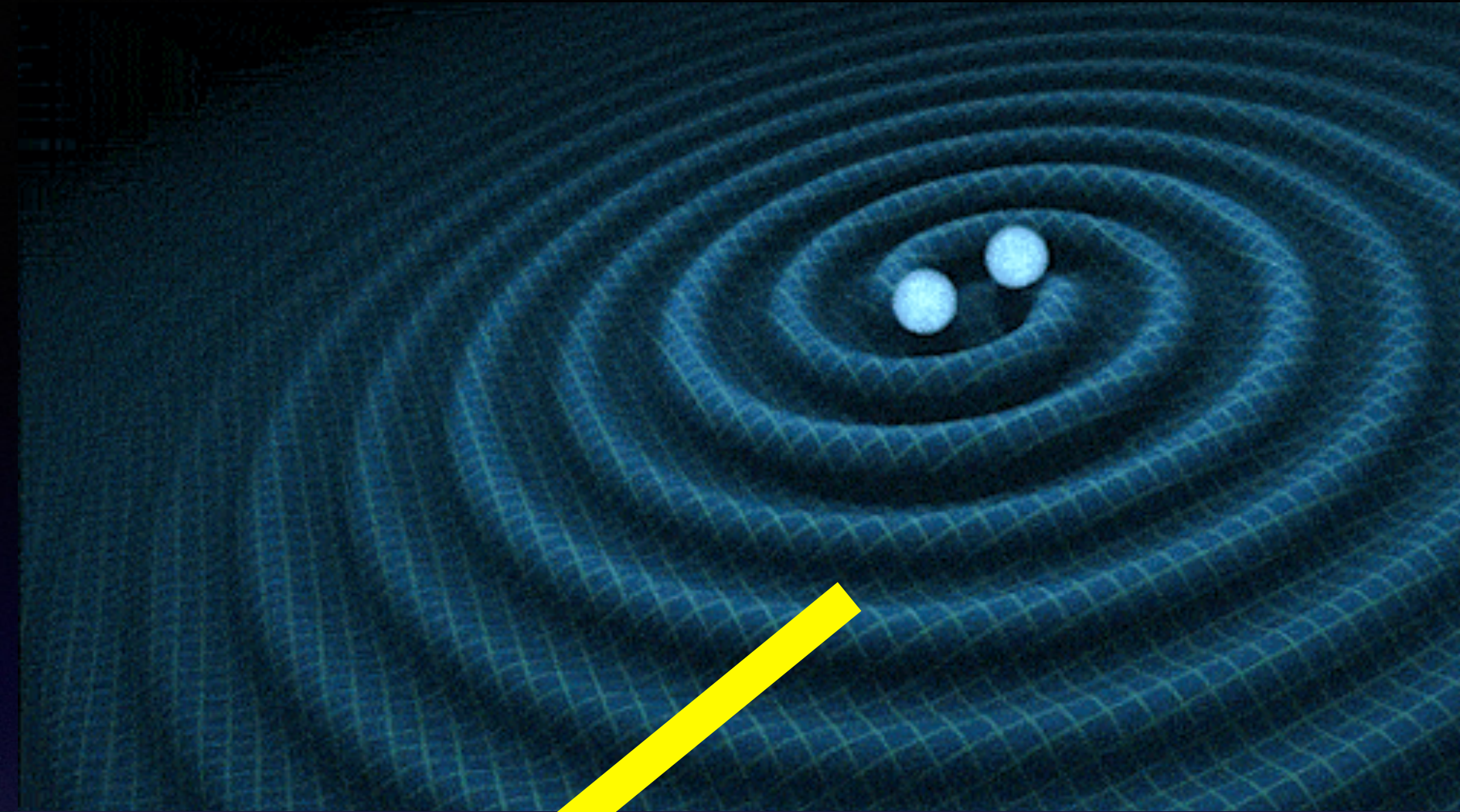






# 重力波の発生と伝播

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

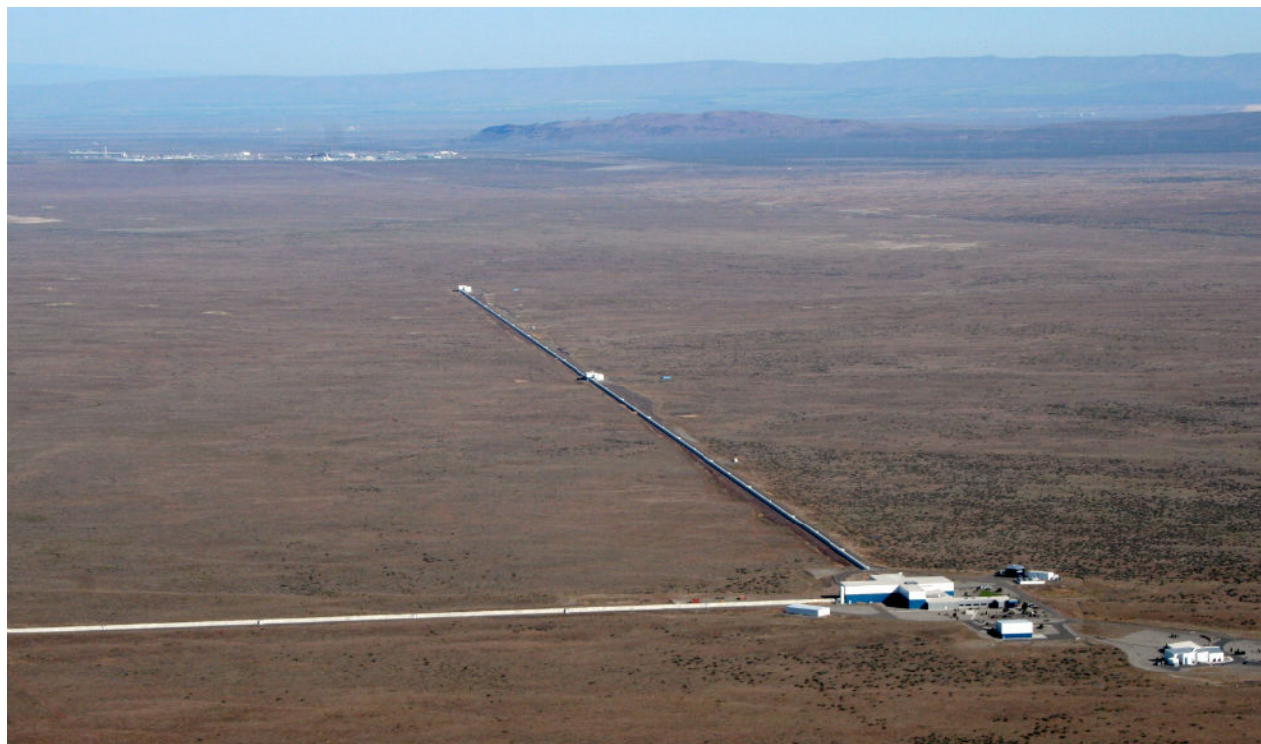
Gravitational-Wave Observatory



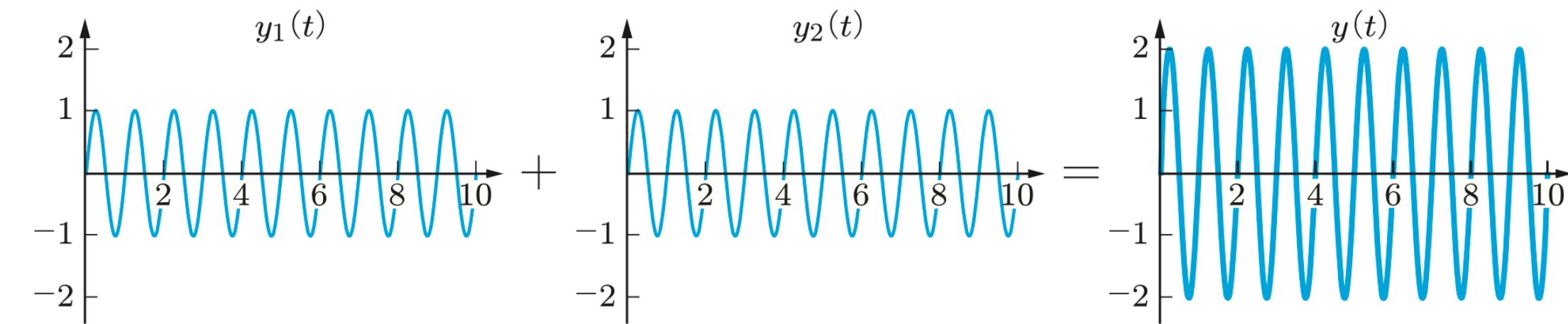
# レーザー干渉計のしくみ： 干渉とは

干渉＝波が重なって強めあったり弱めあったりする現象

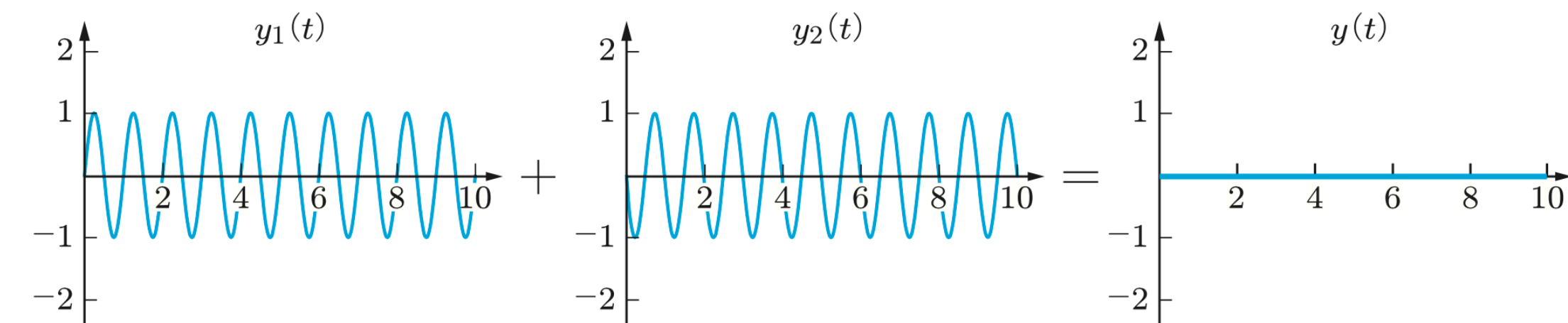
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO,らいご)



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



山＋山＝強めあう



山＋谷＝弱めあう

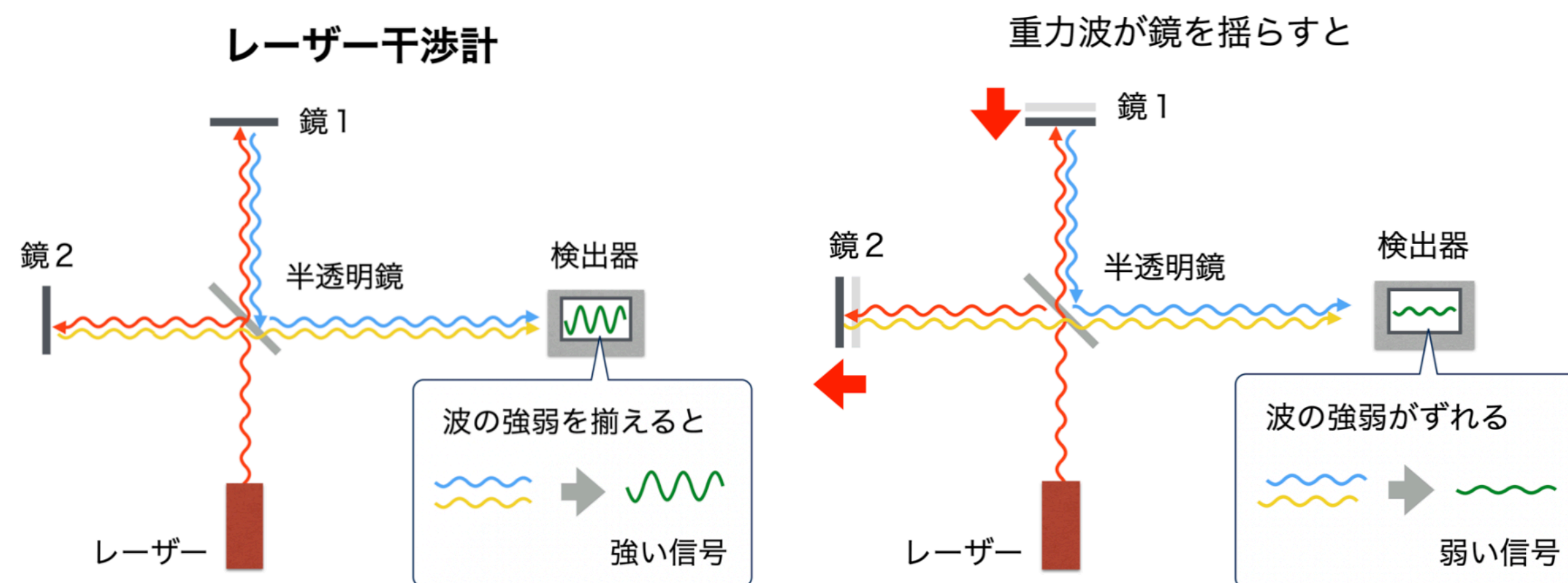


図 18 レーザー干渉計の概念図.



# レーザー干渉計のしくみ

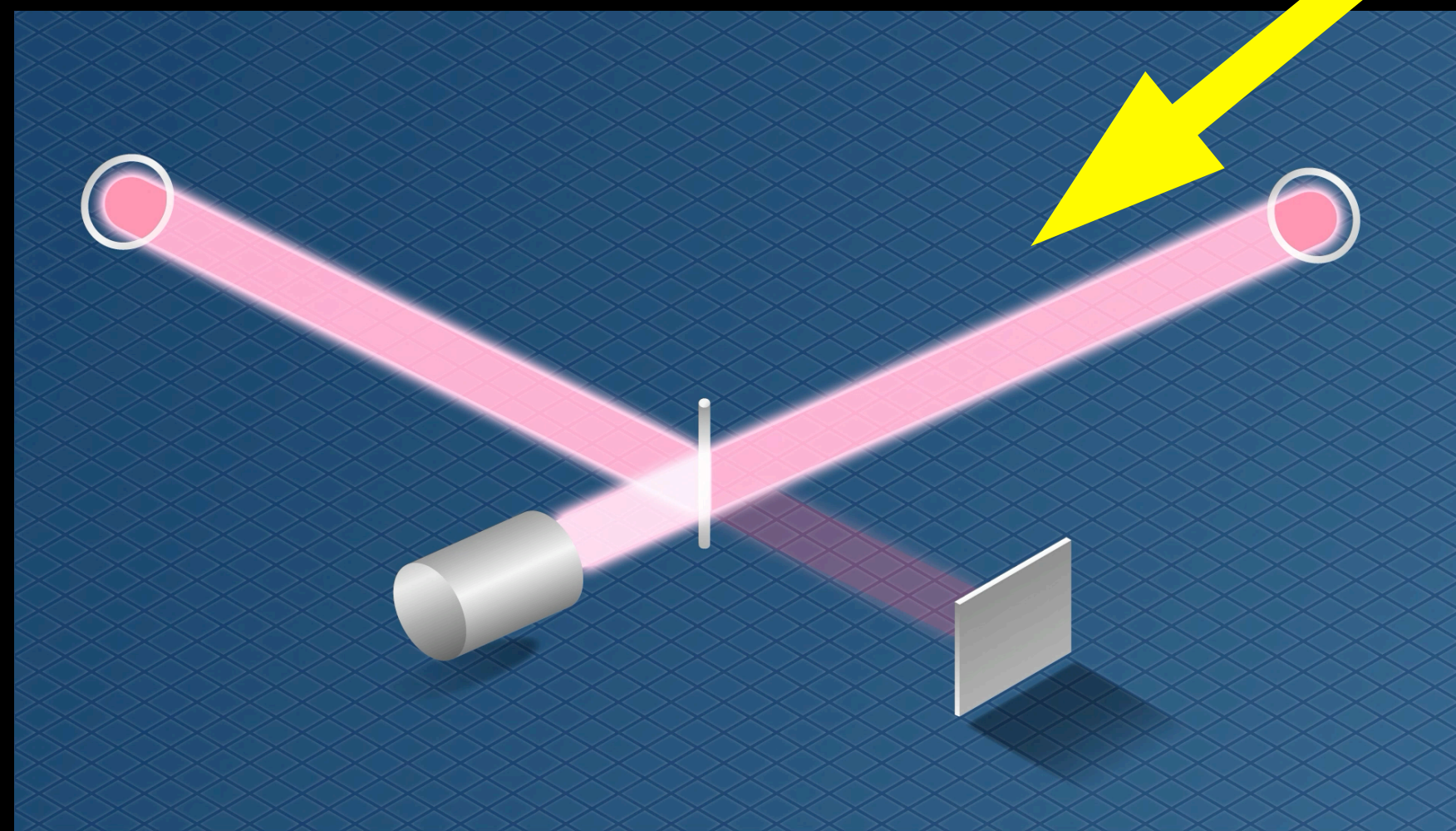
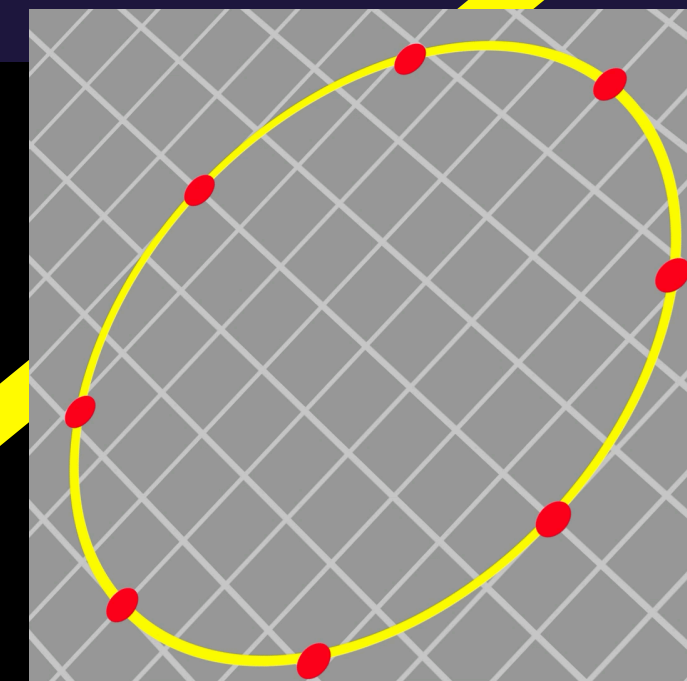
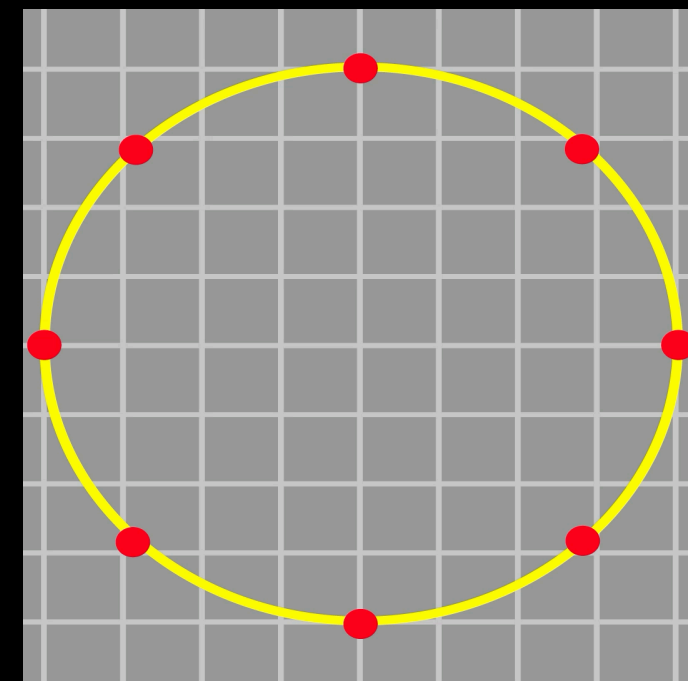
## Michelson Interferometer

MIT Department of Physics  
Technical Services Group



# 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

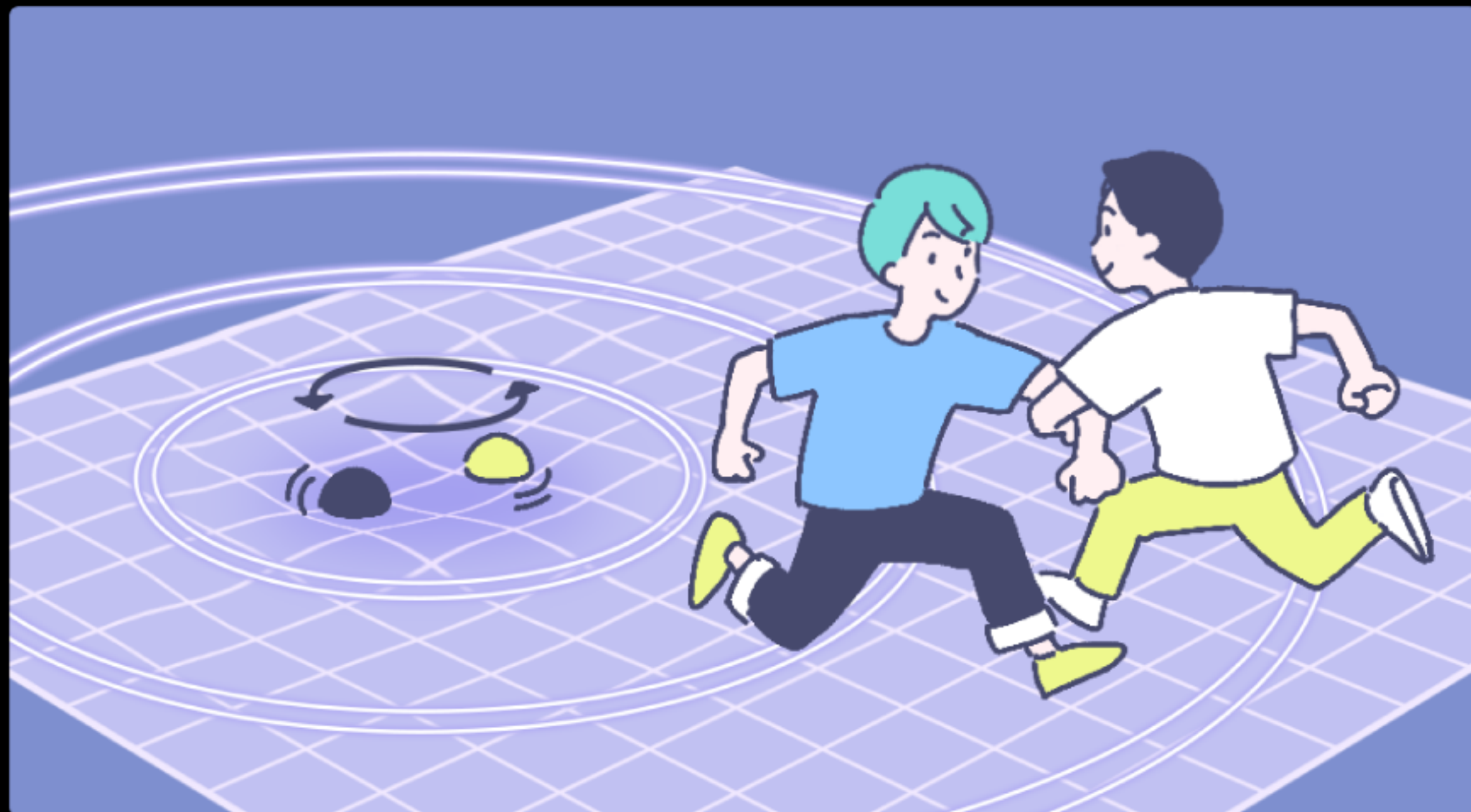
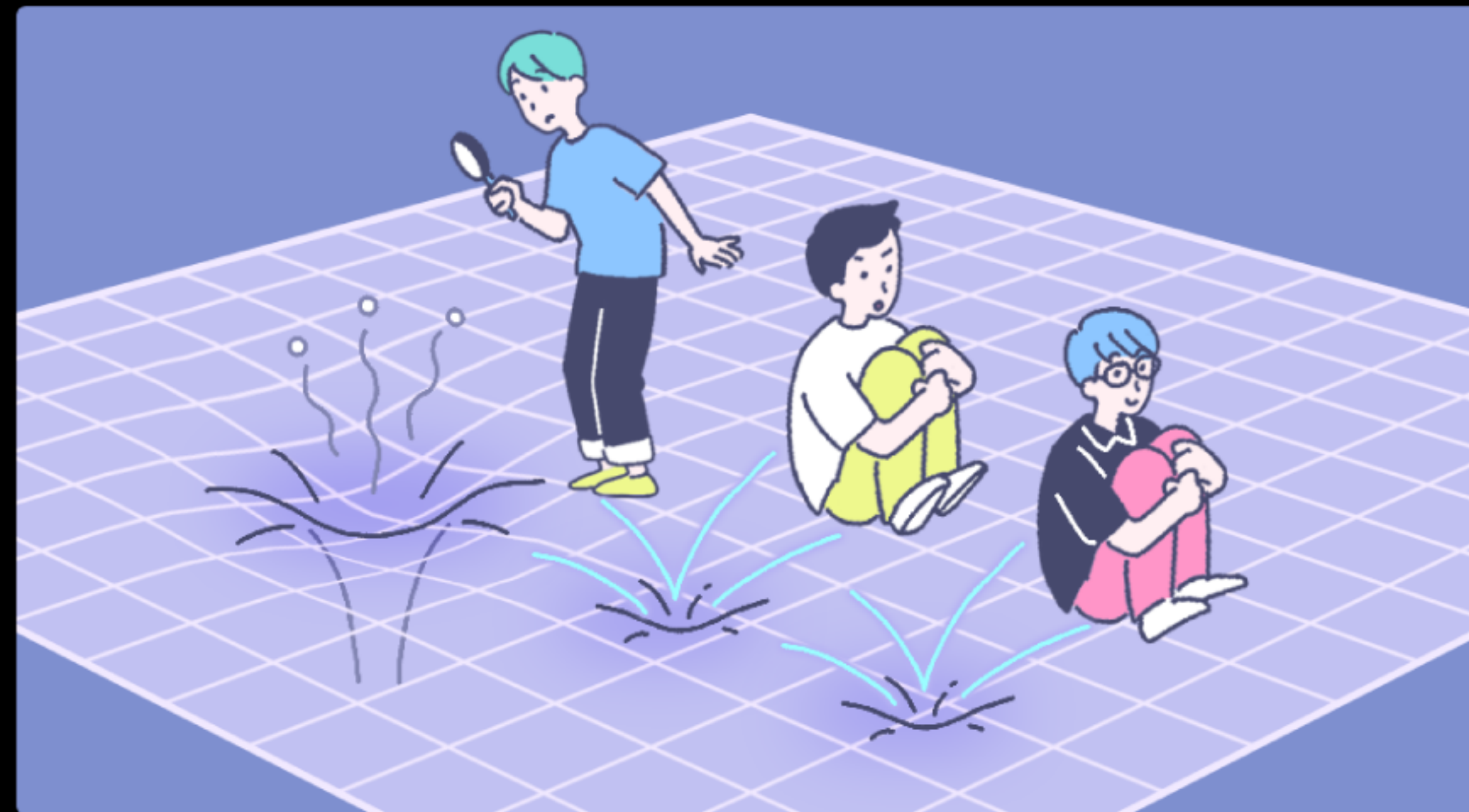
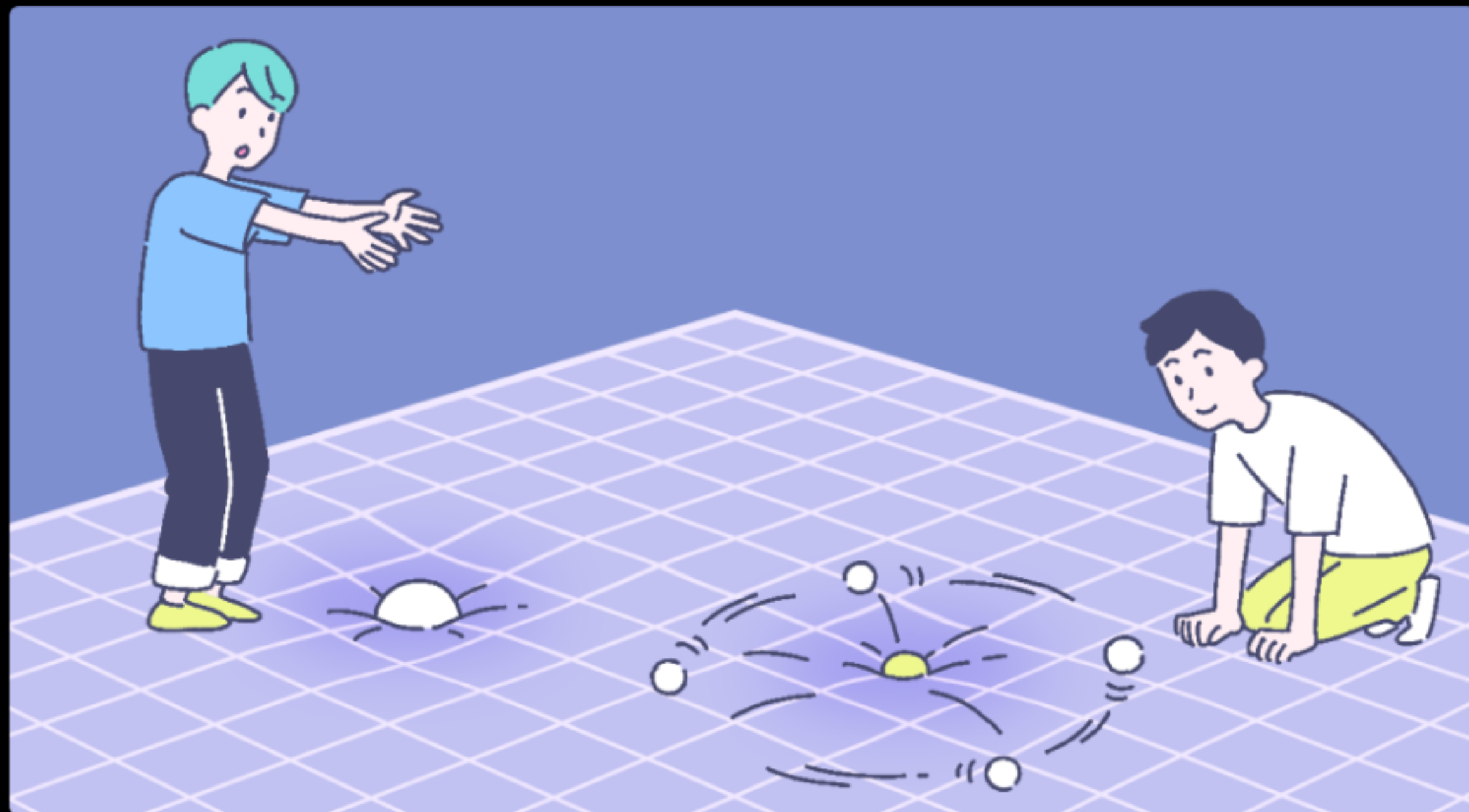


レーザー干渉計

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



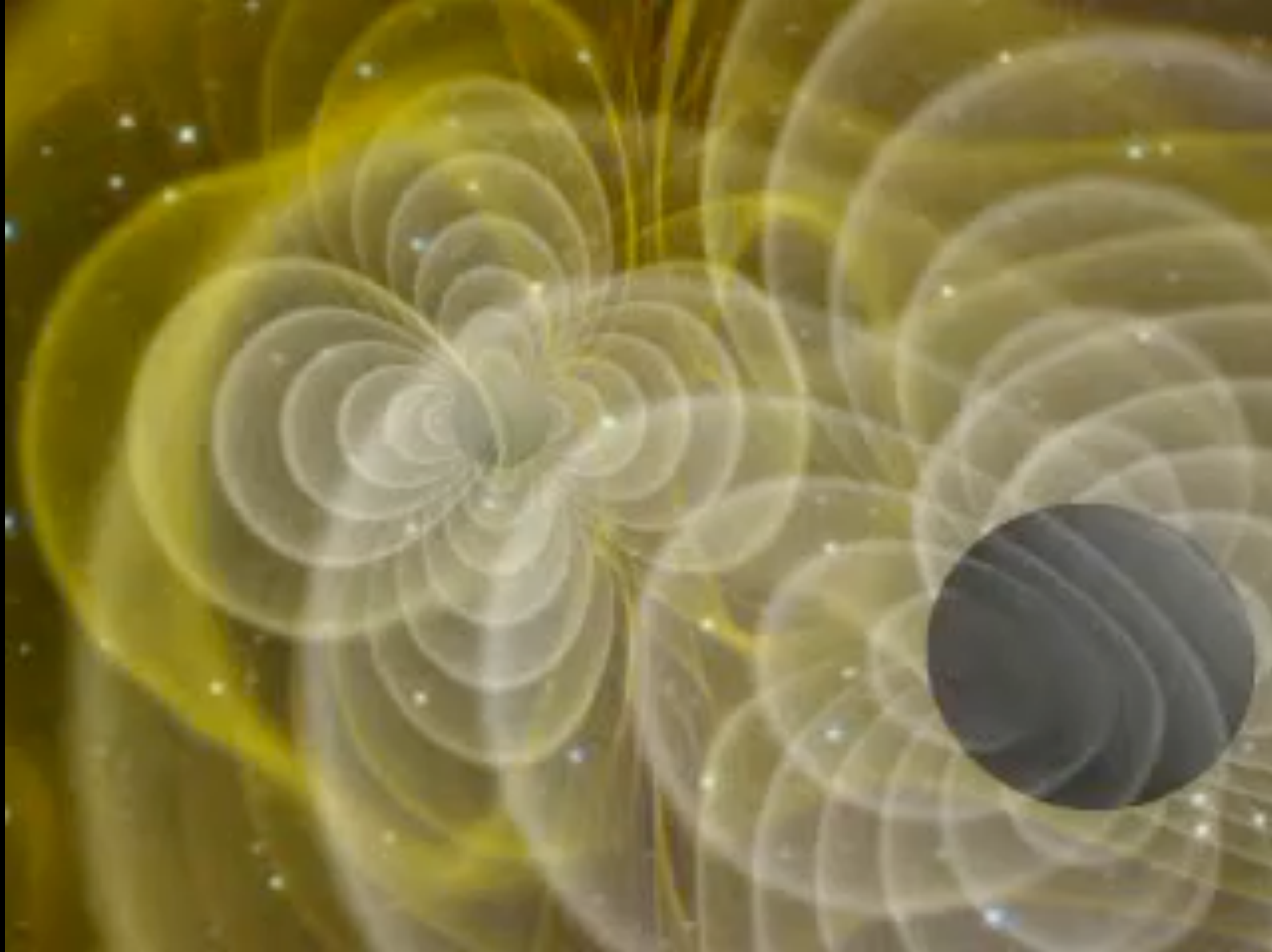








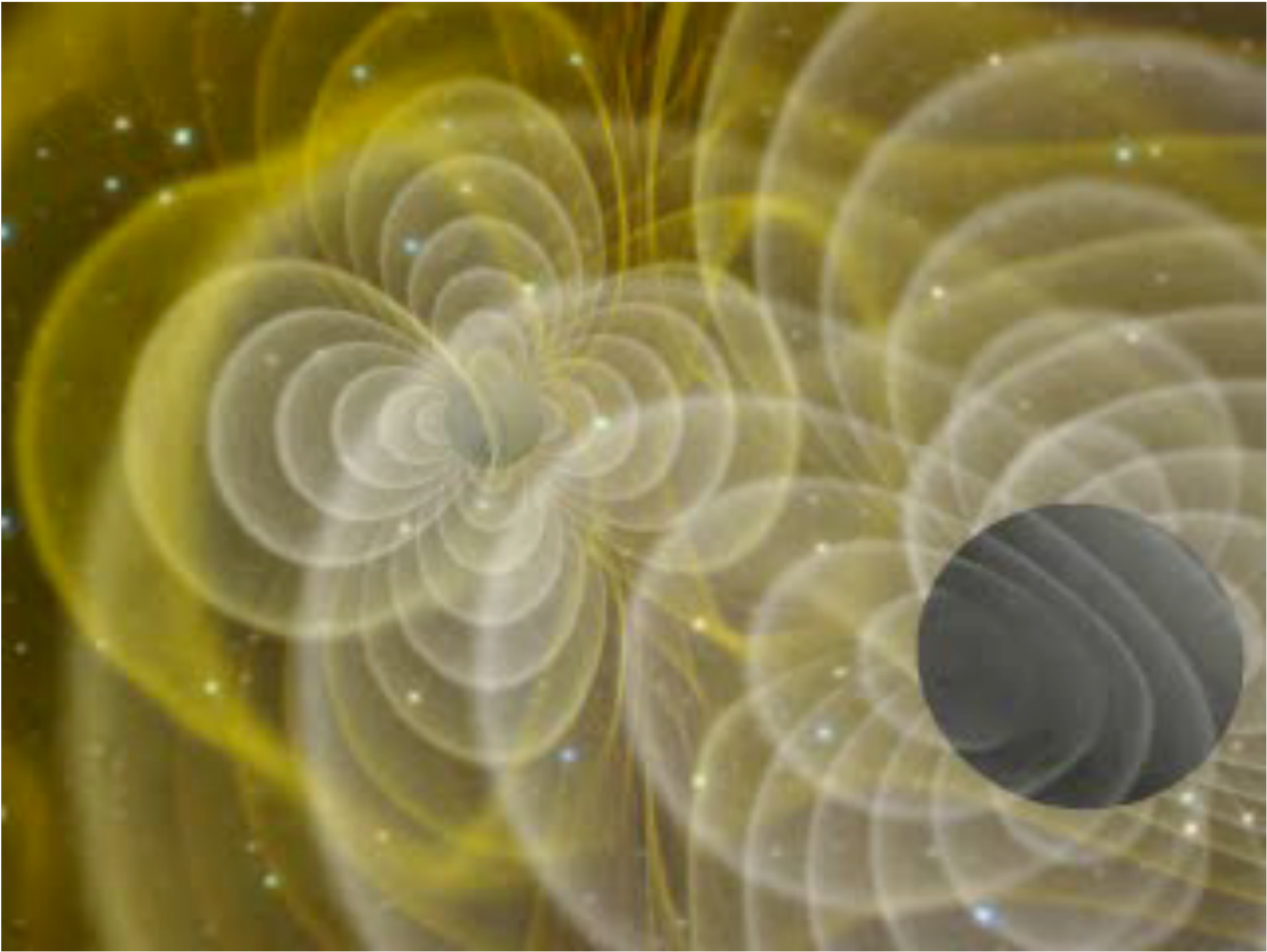
# ブラックホールの合体シミュレーション



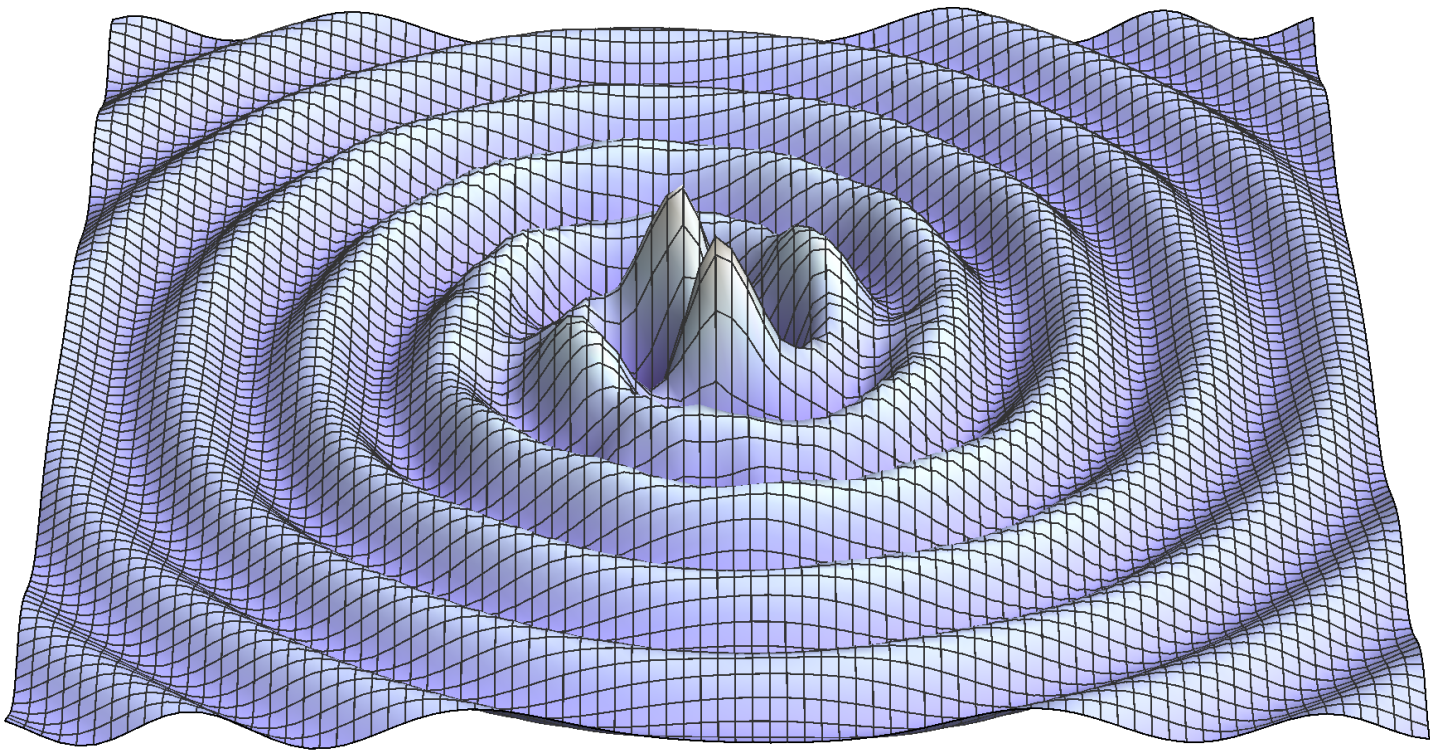
NCSA-AEI group (1998)



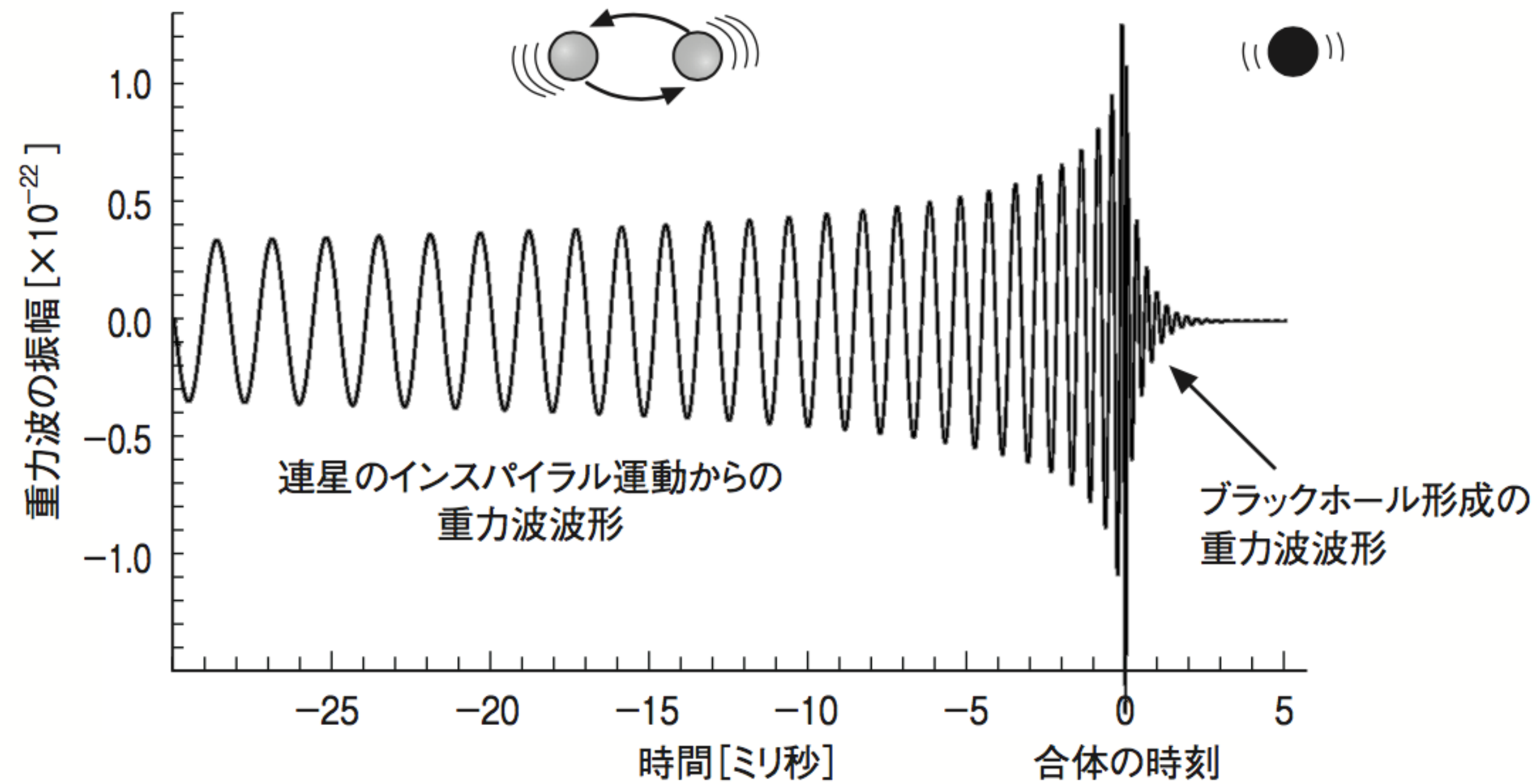
# 連星合体からの重力波の波形(理論予測)



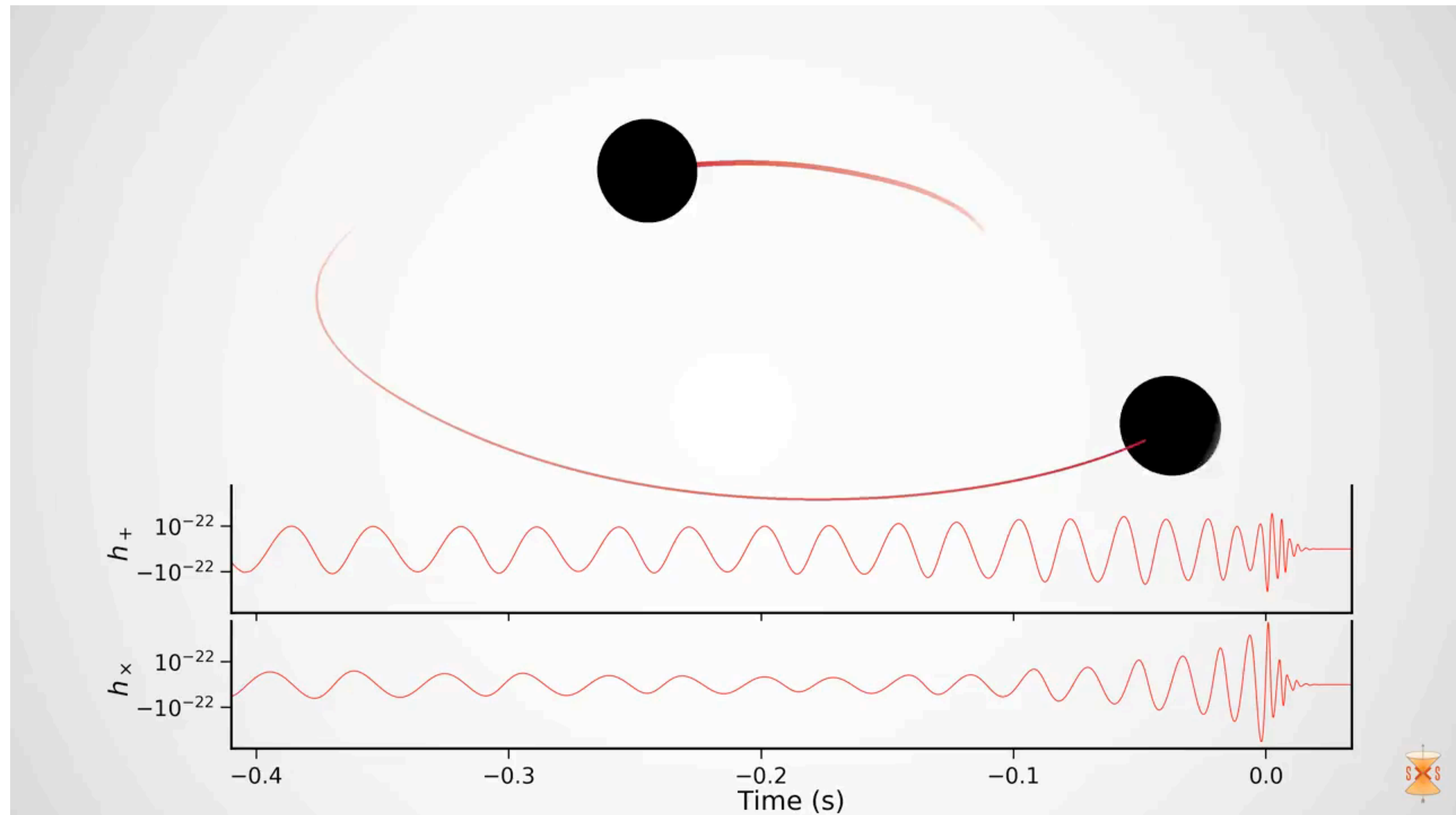
(NCSA-AEIグループ, 1998年)



**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.

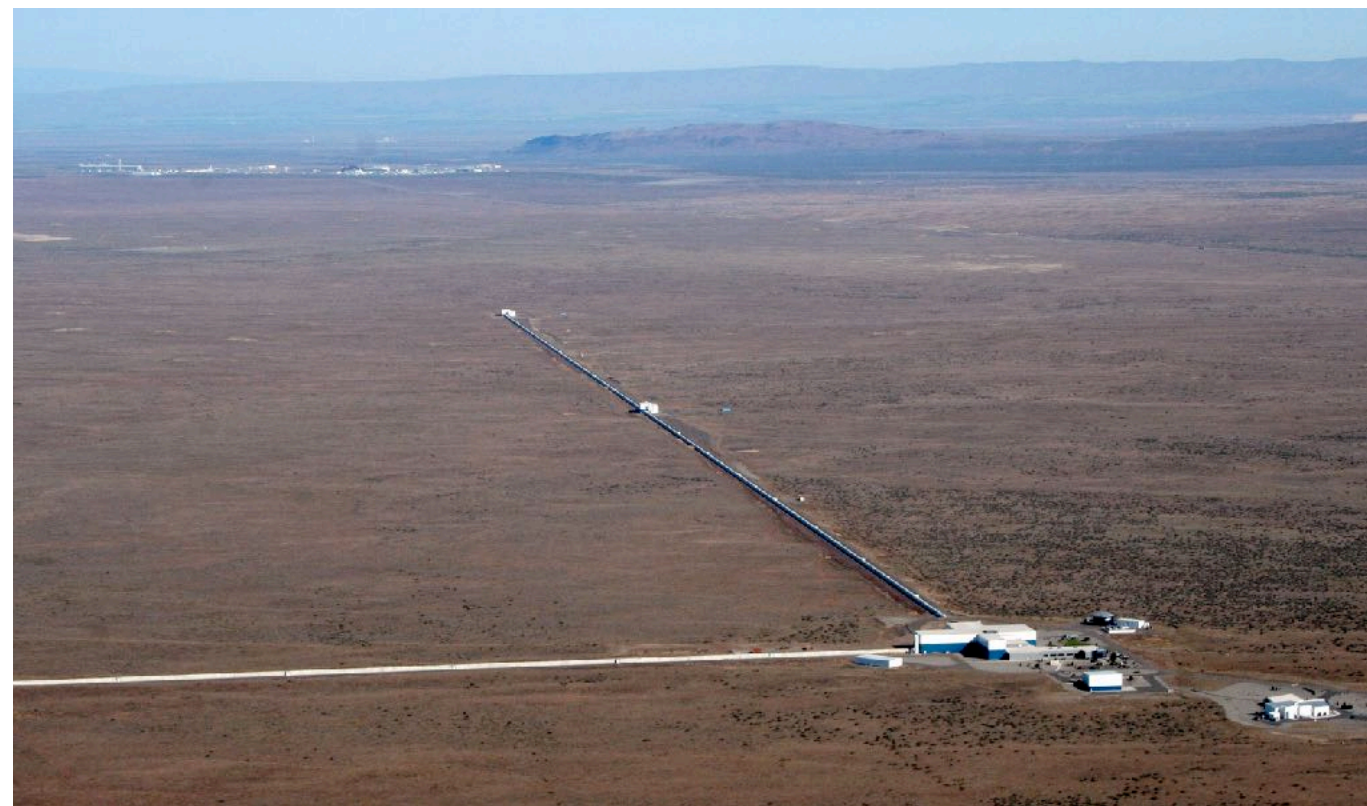
The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation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



# 世界の重力波天文台（レーザー干渉計）

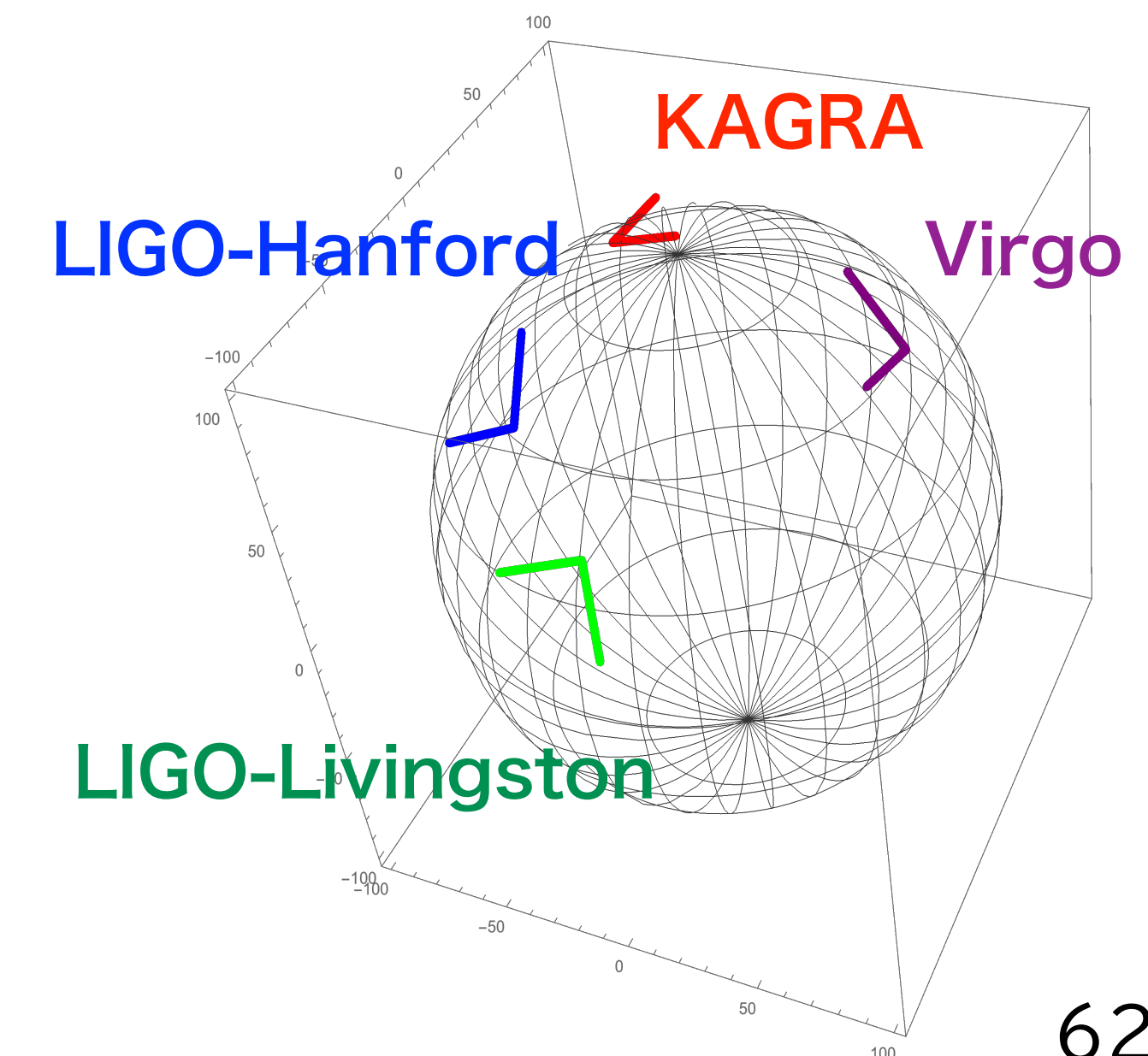
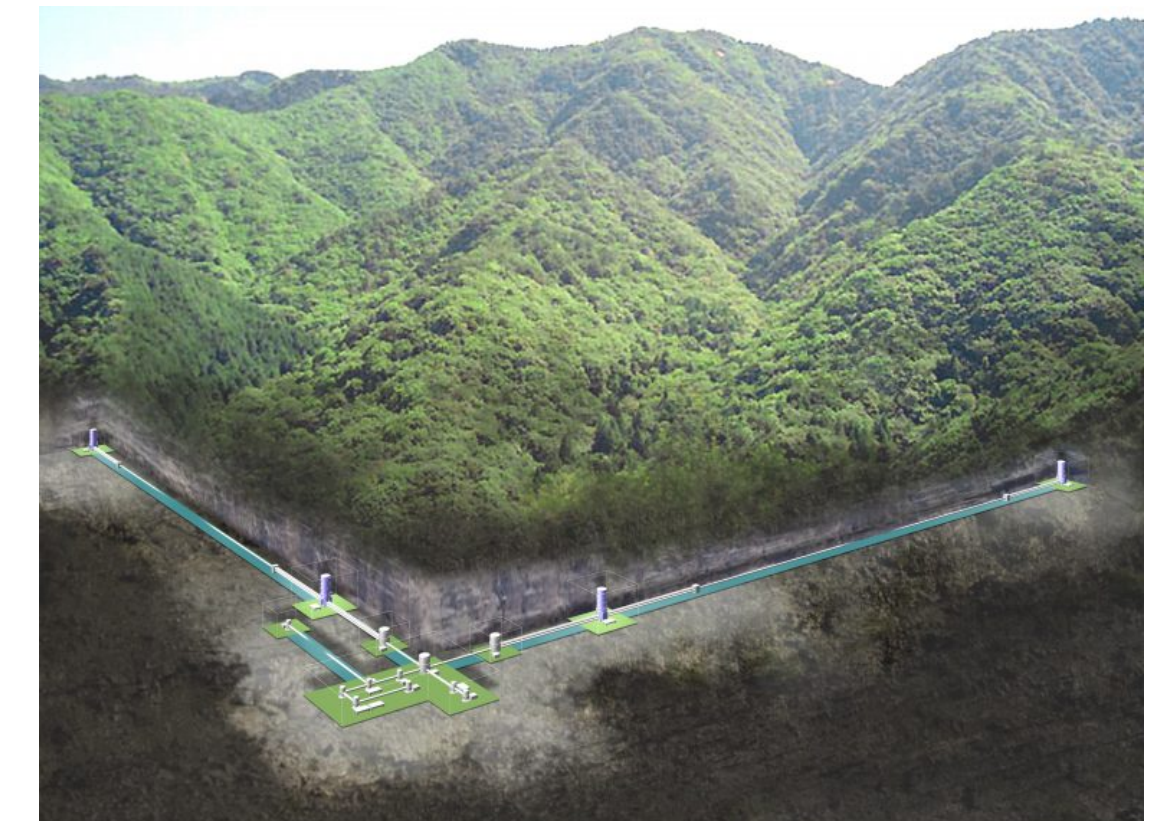
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)





# 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)



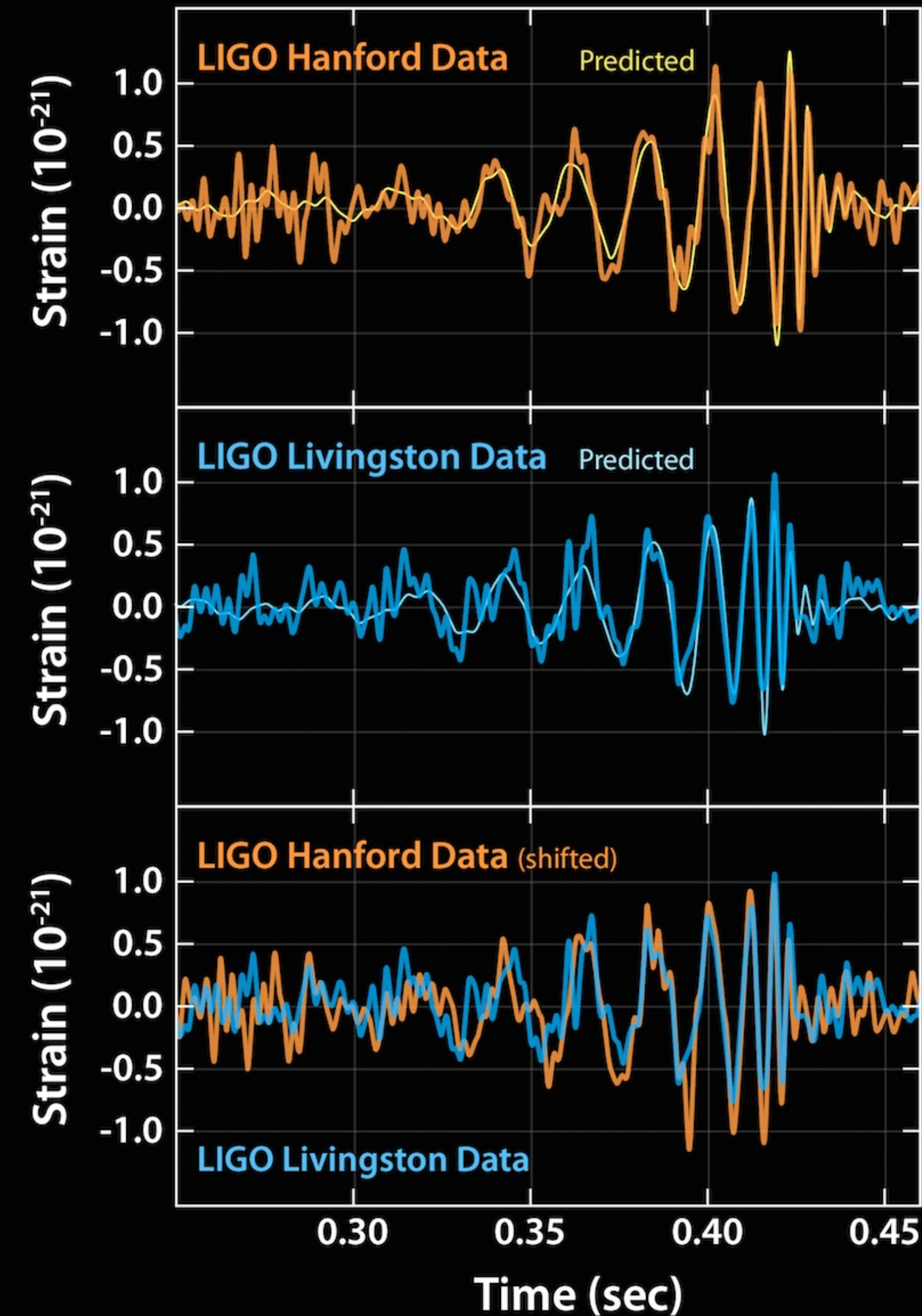


2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



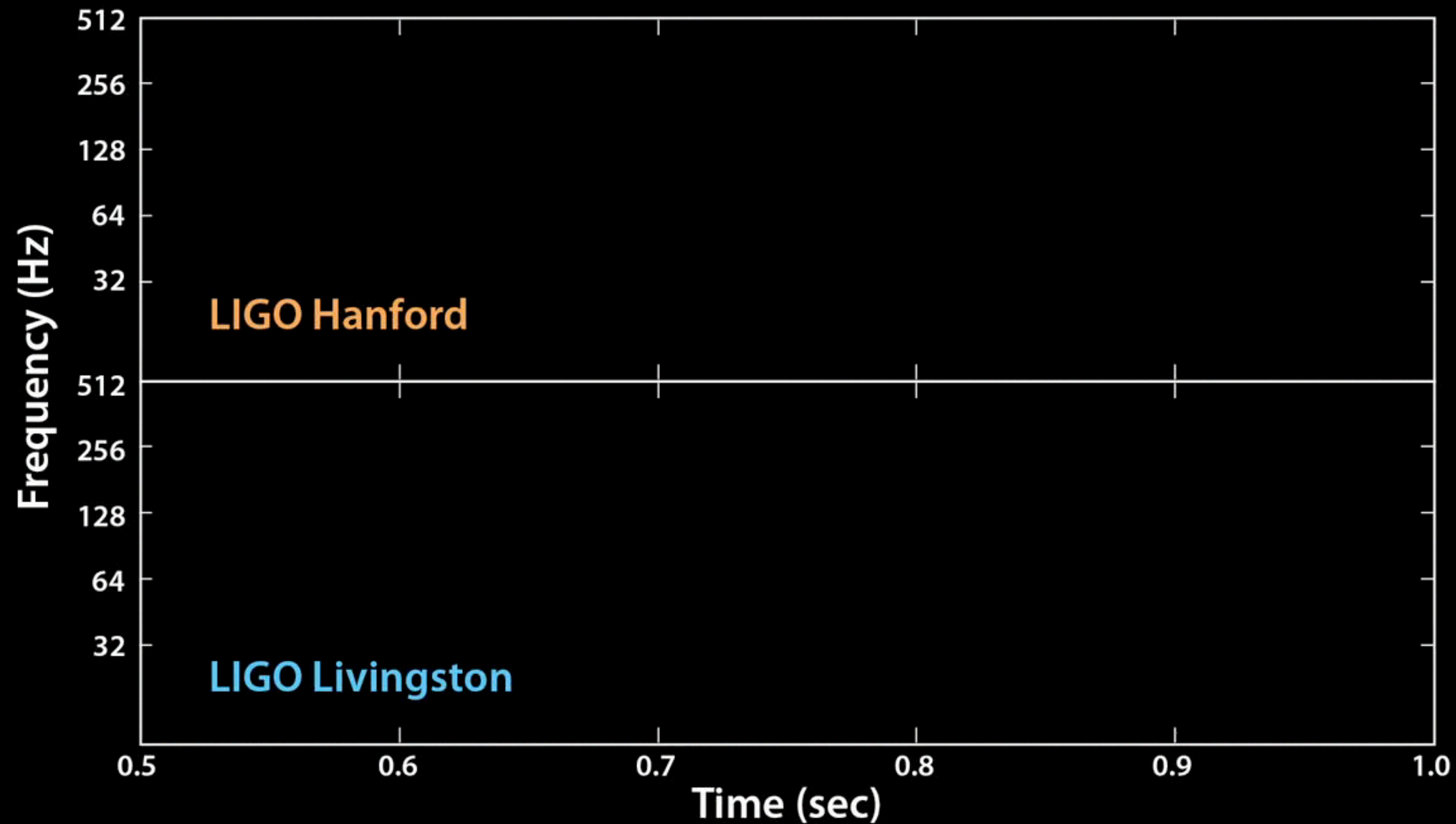
ブラックホール連星の合体  
によって生じた重力波だった

2015年9月14日





# 重力波波形を音にすると. . .

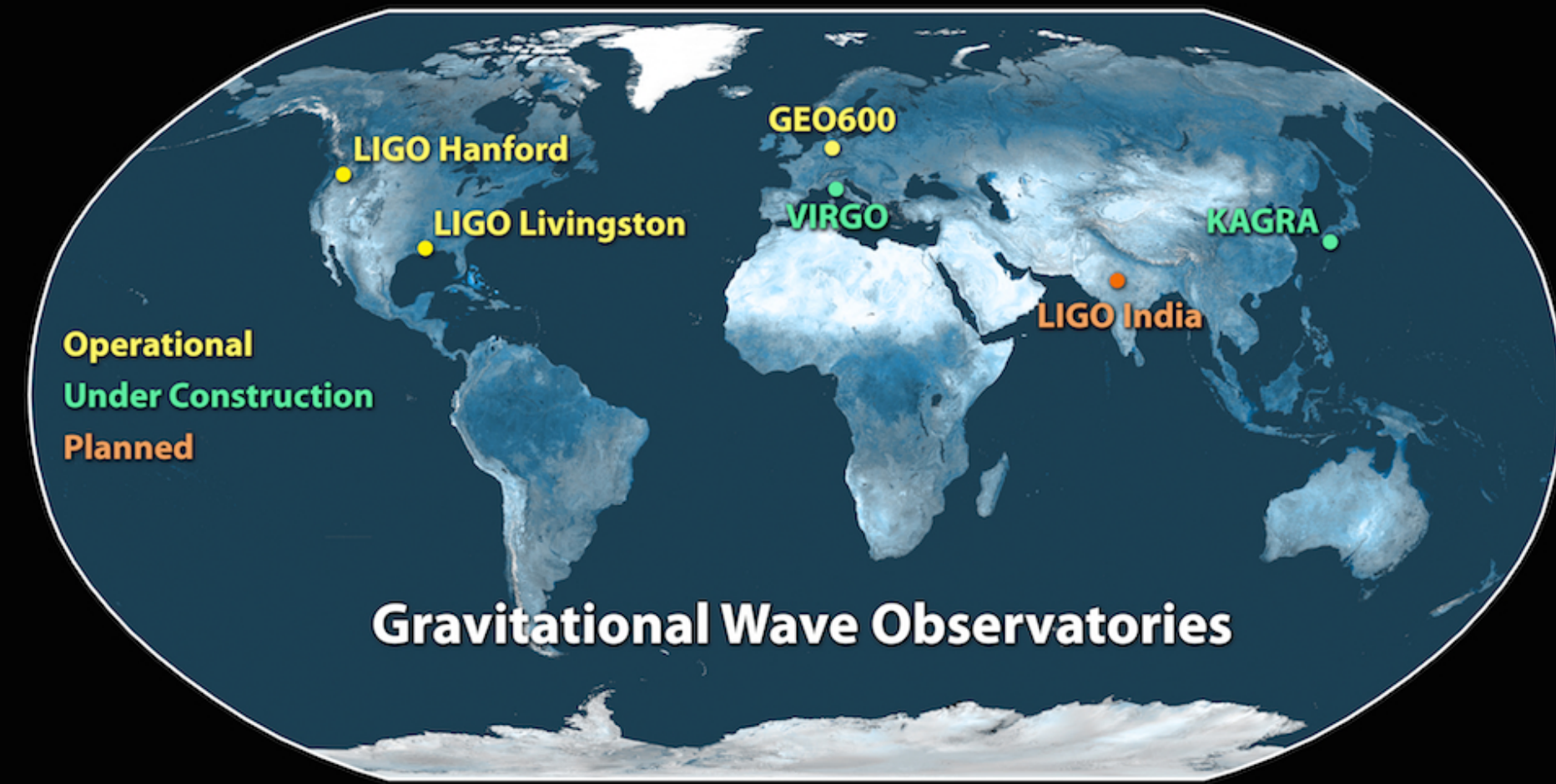
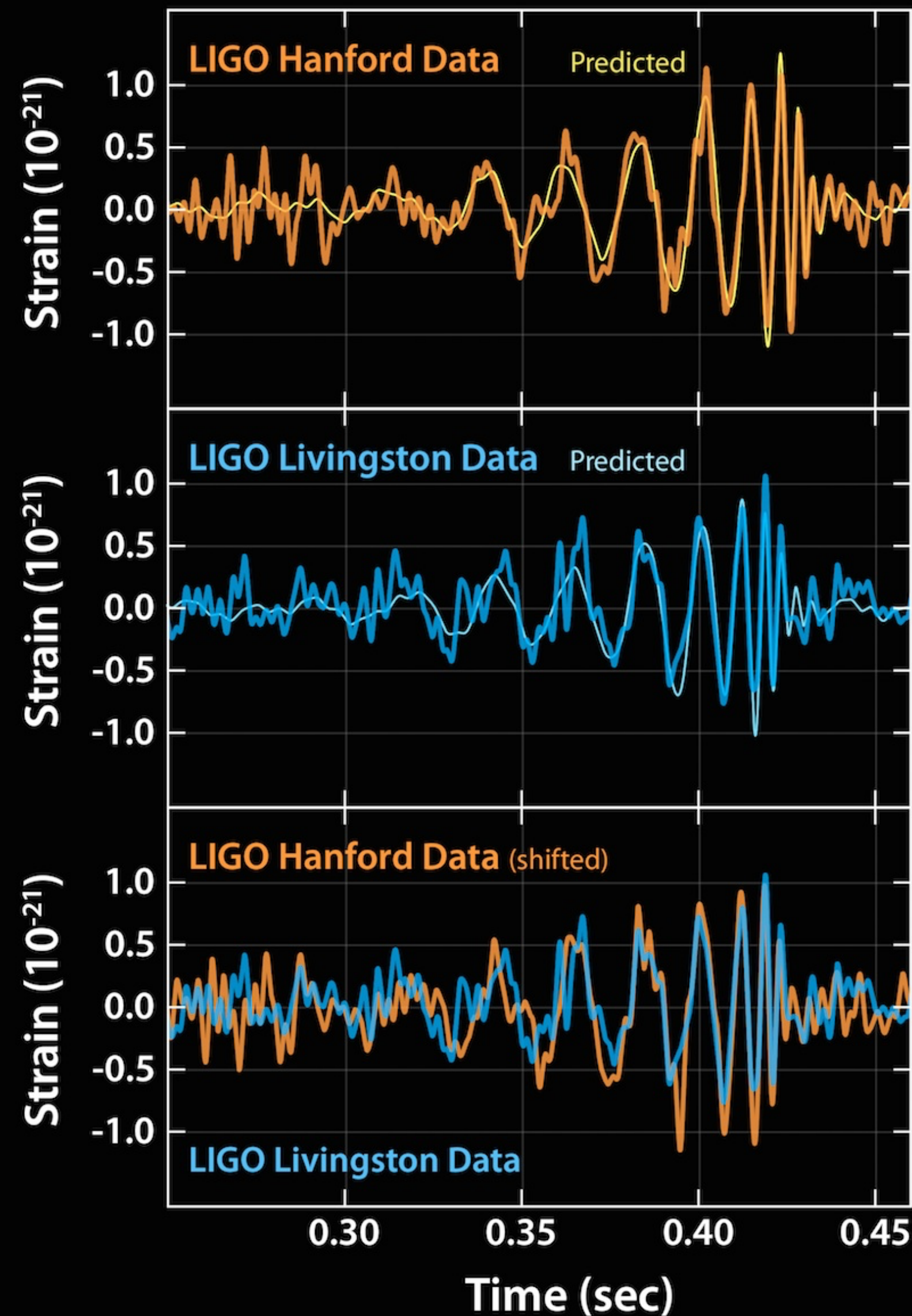


はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞えやすいように+400Hz

<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**

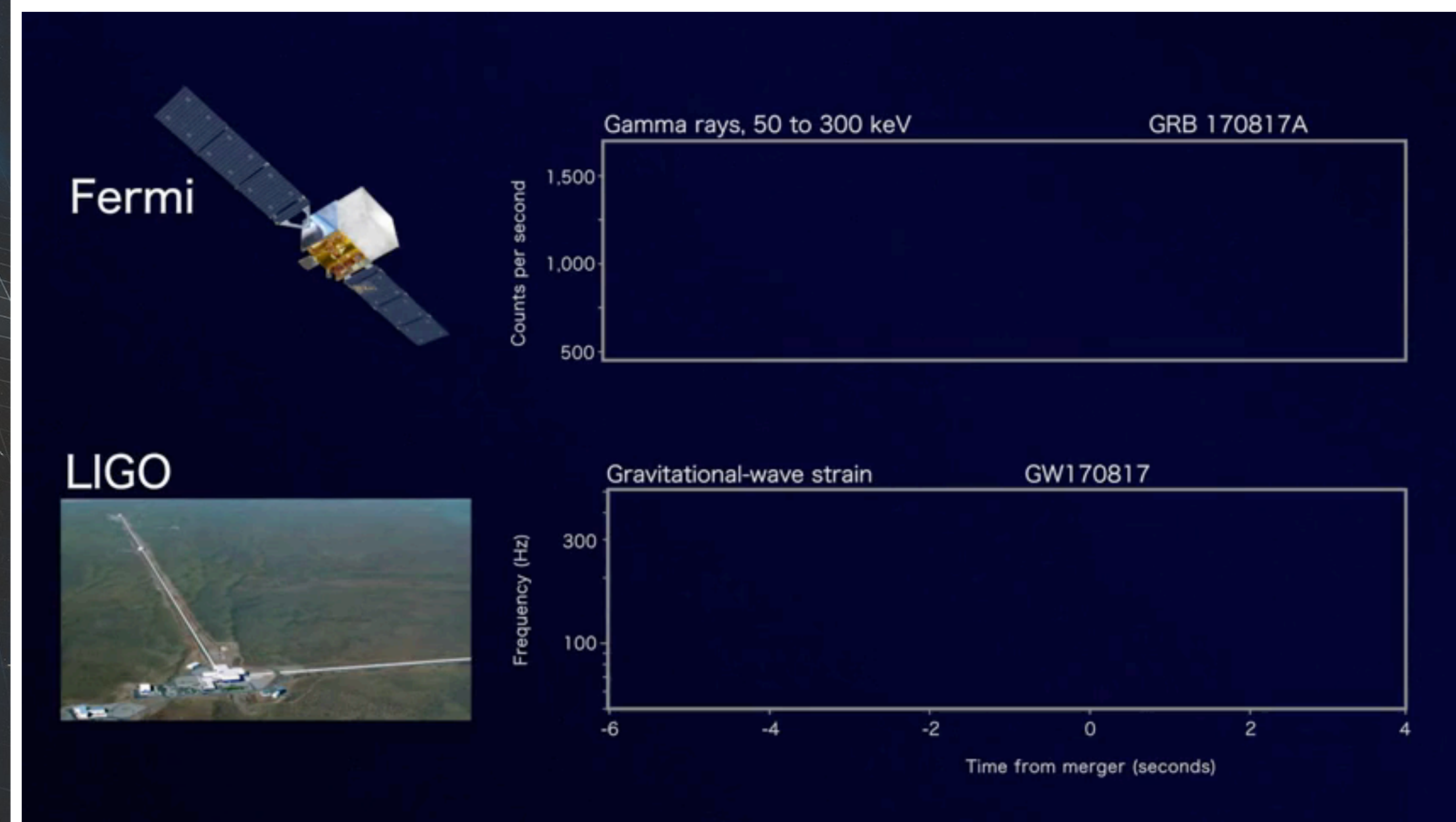
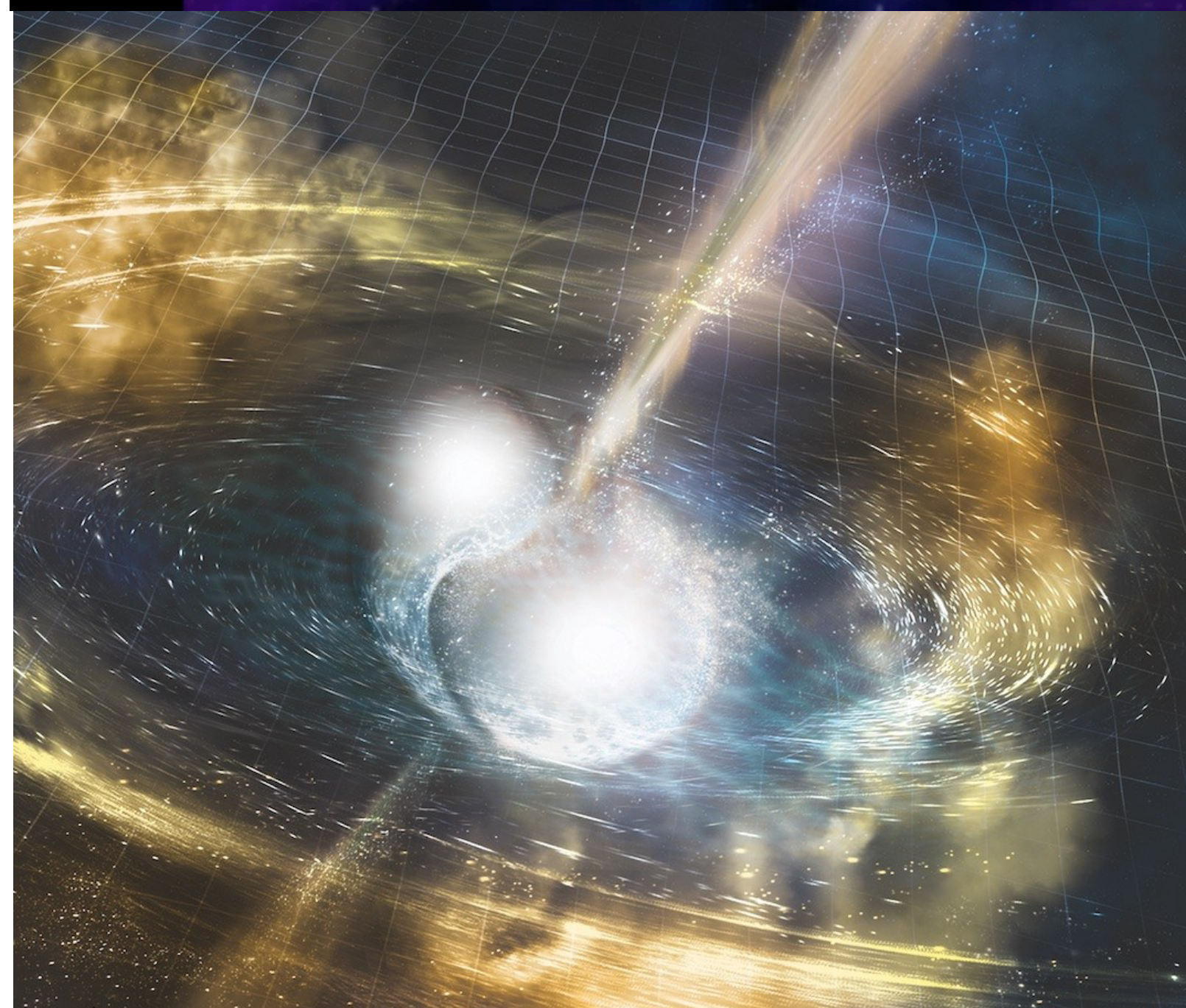
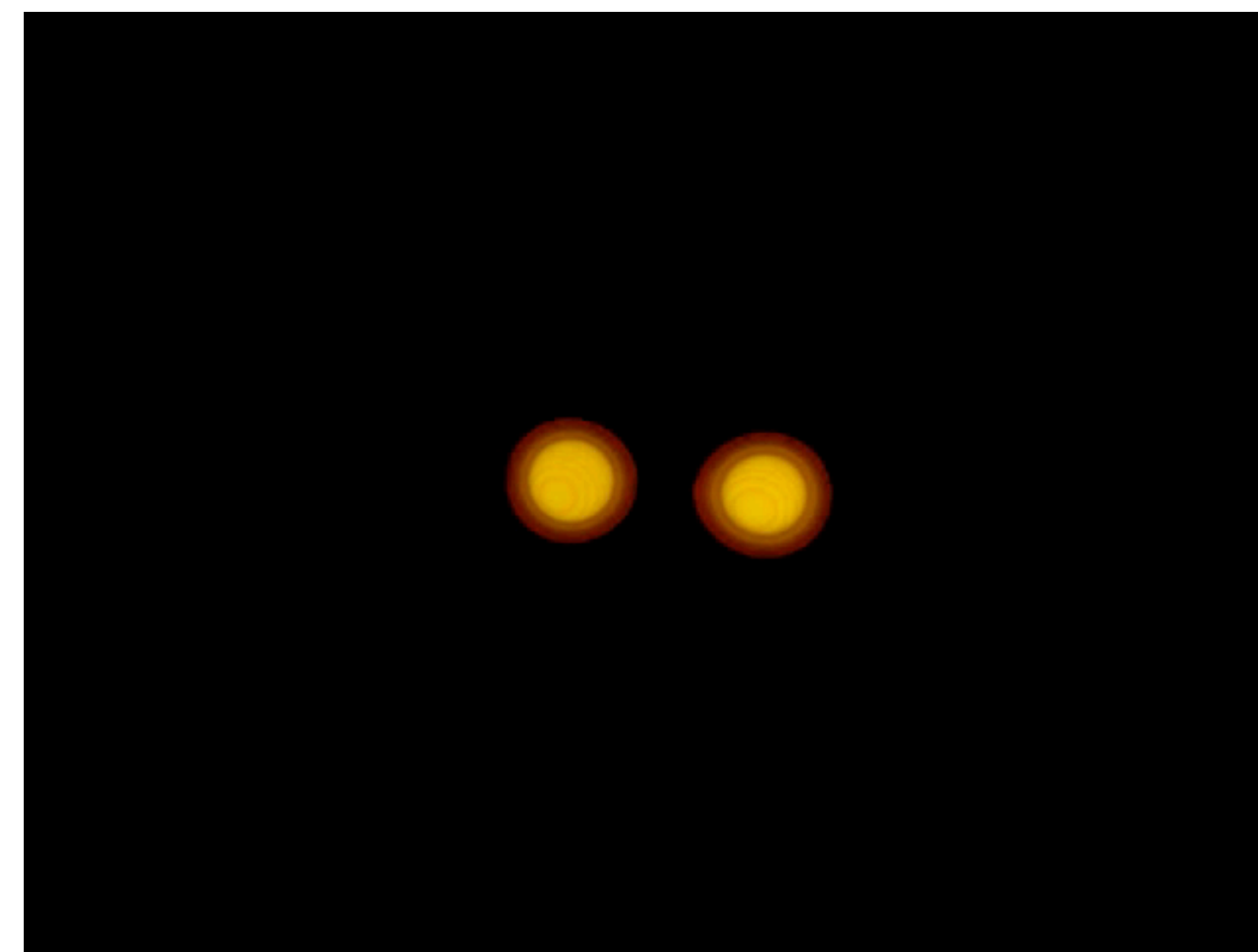
ライナー・ワイス(85)

バリー・バリッシュ(77)

キップ・ソーン(77)

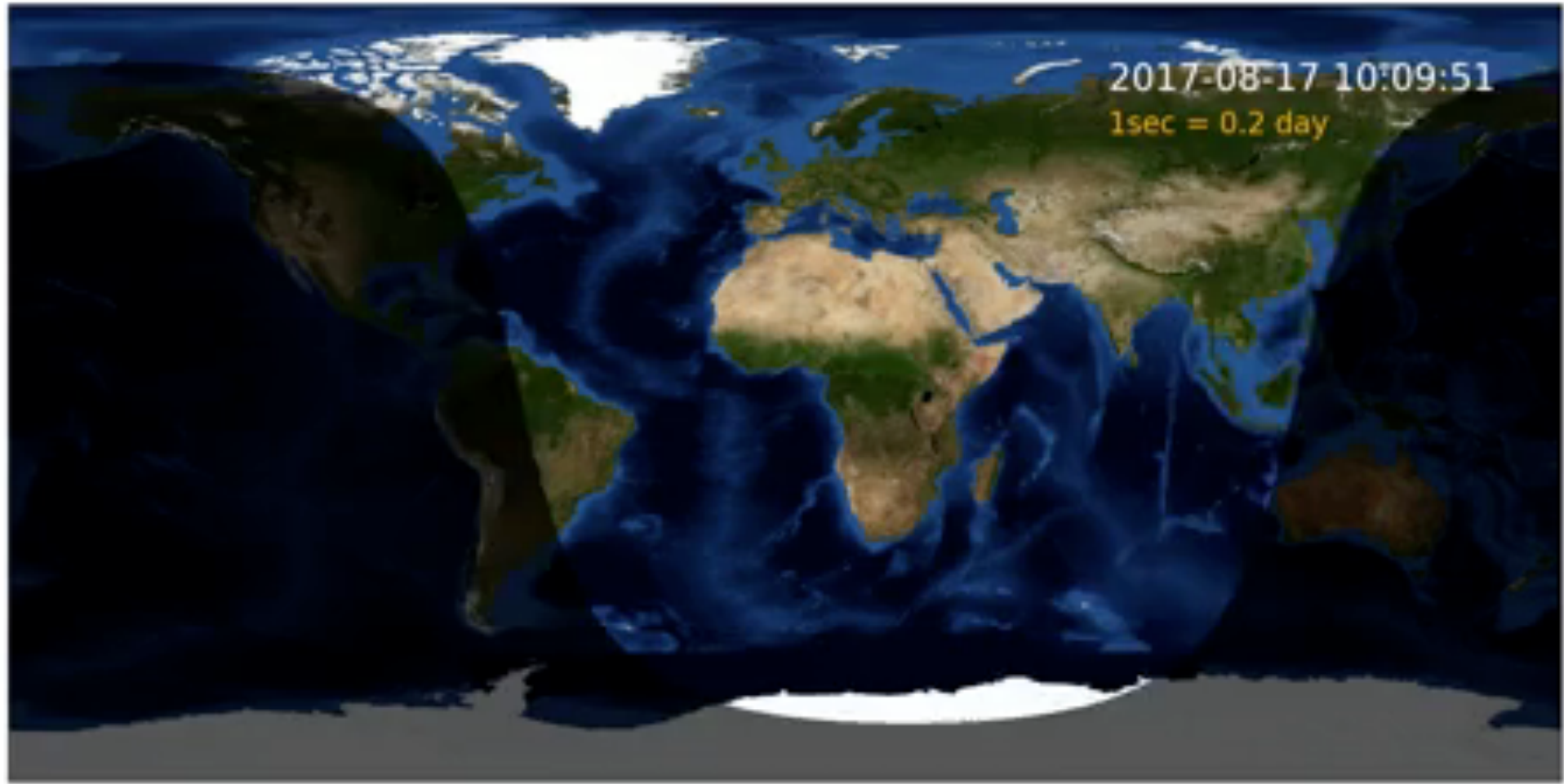
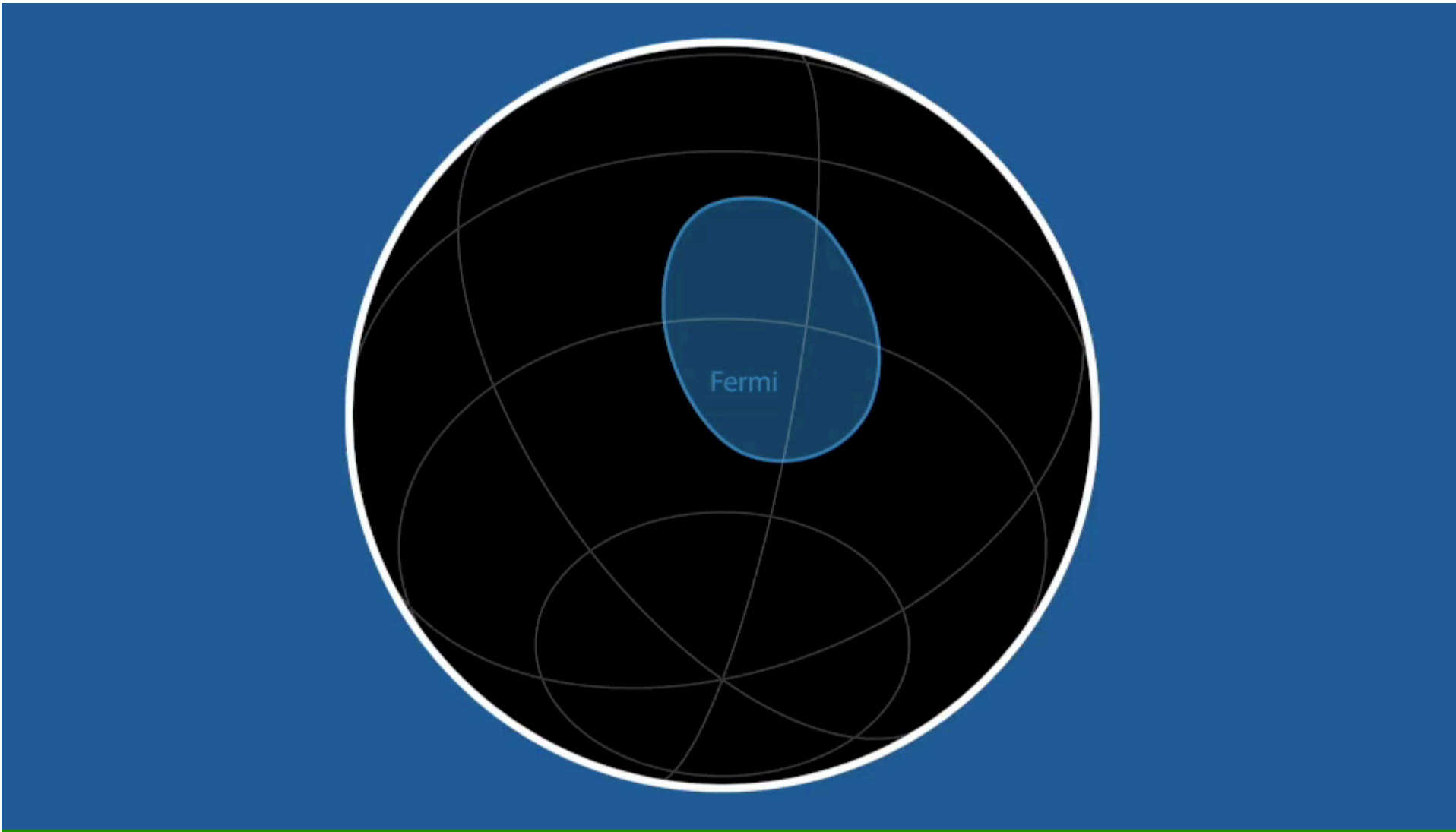


## 連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測





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)

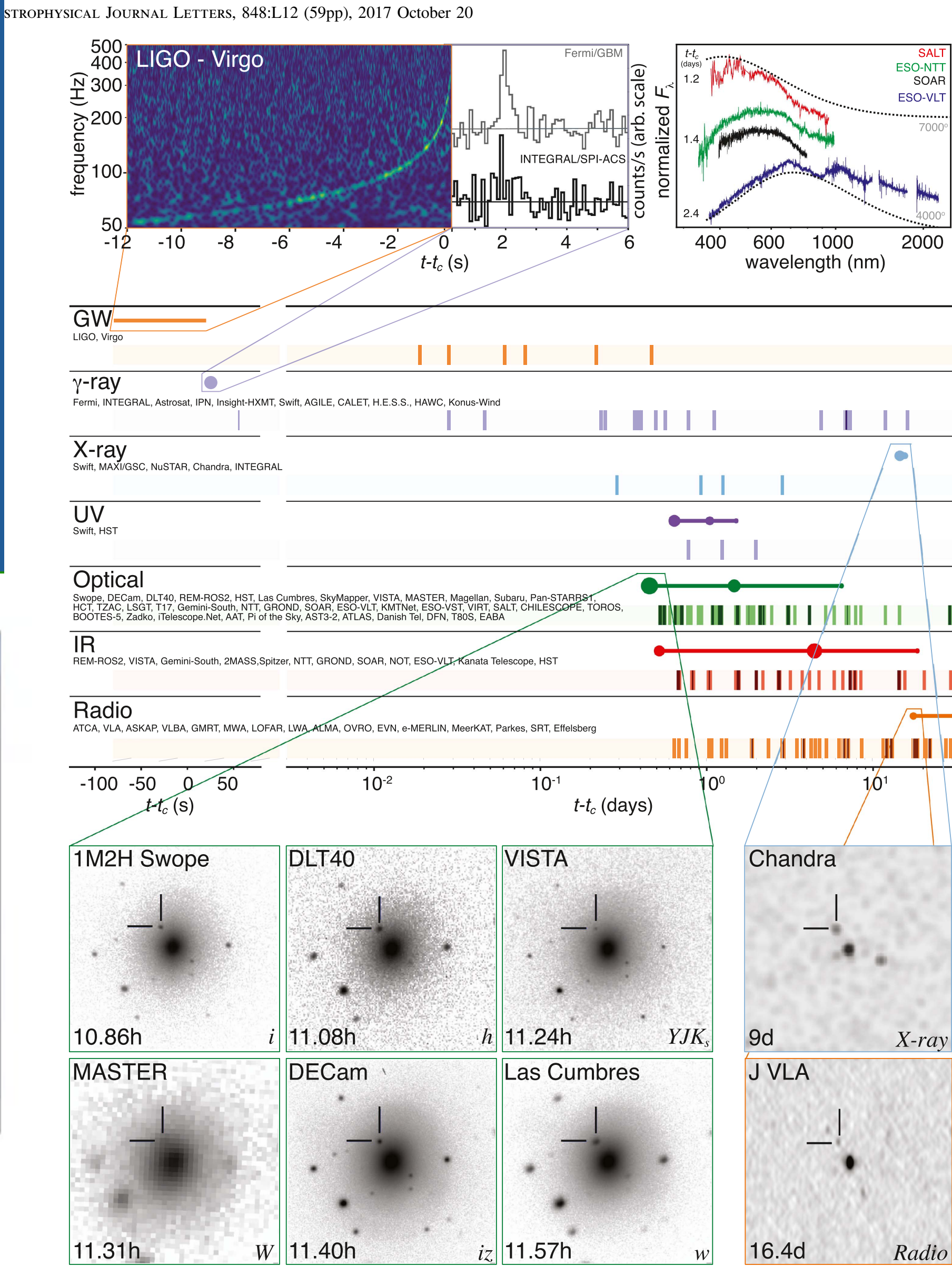
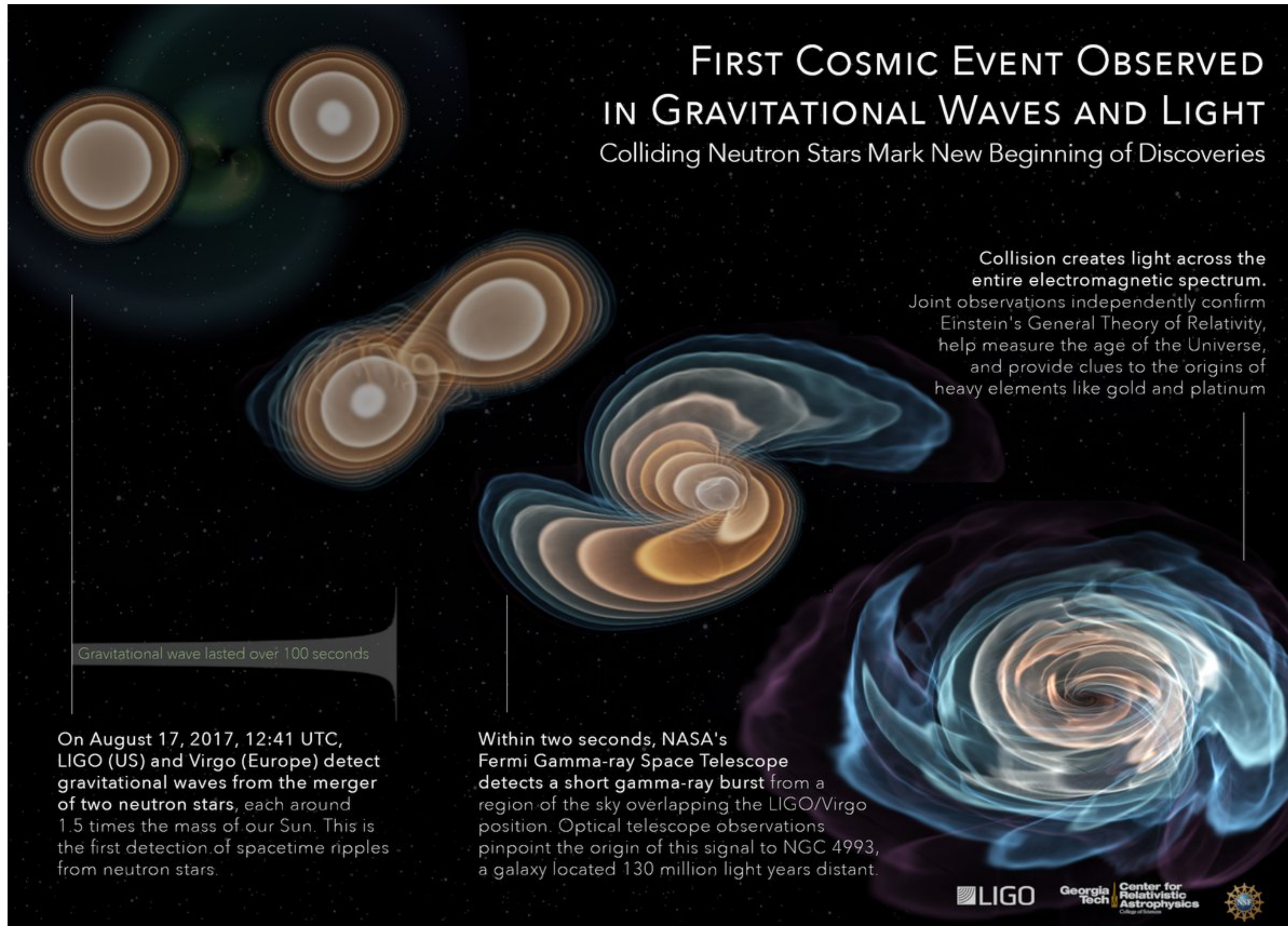


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time  $t_c$  of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent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



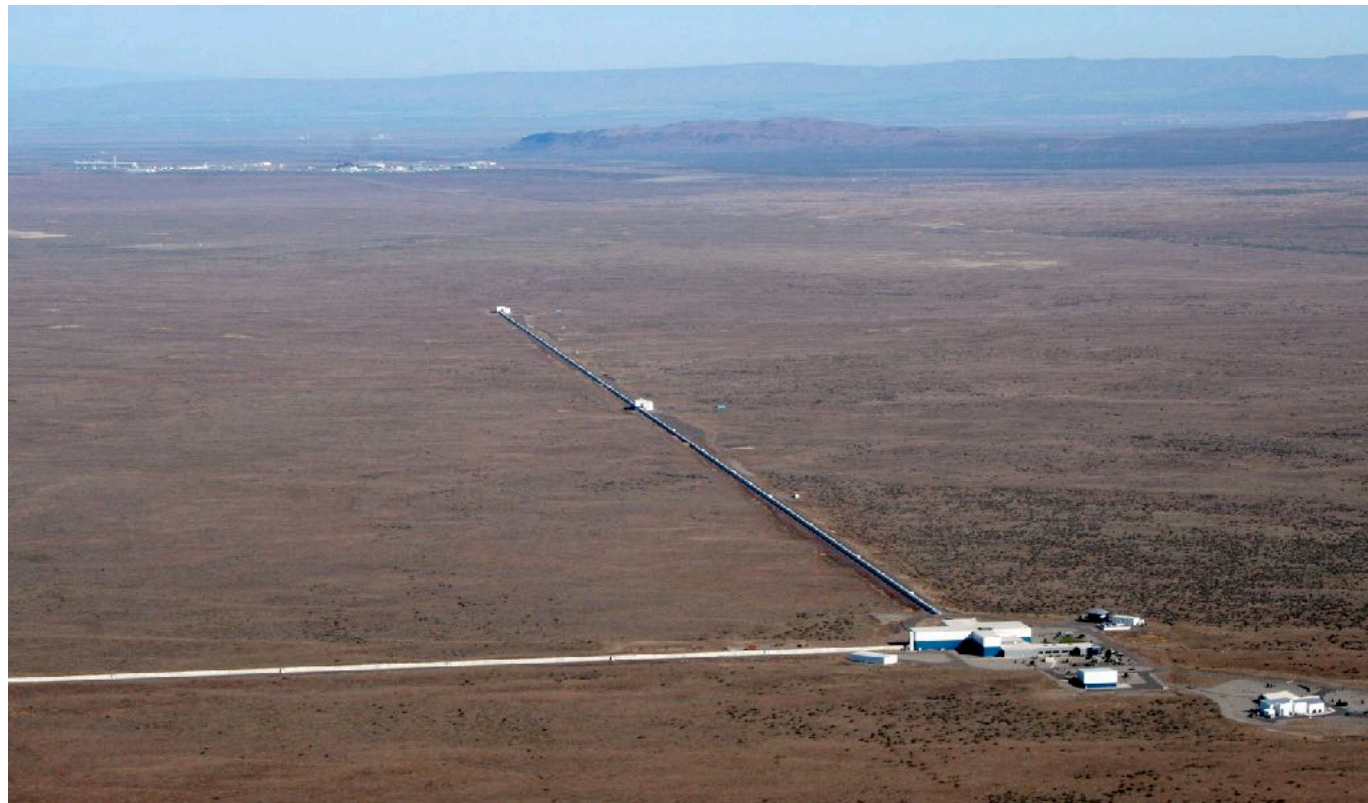
## 連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測





# 世界の重力波天文台（レーザー干渉計）

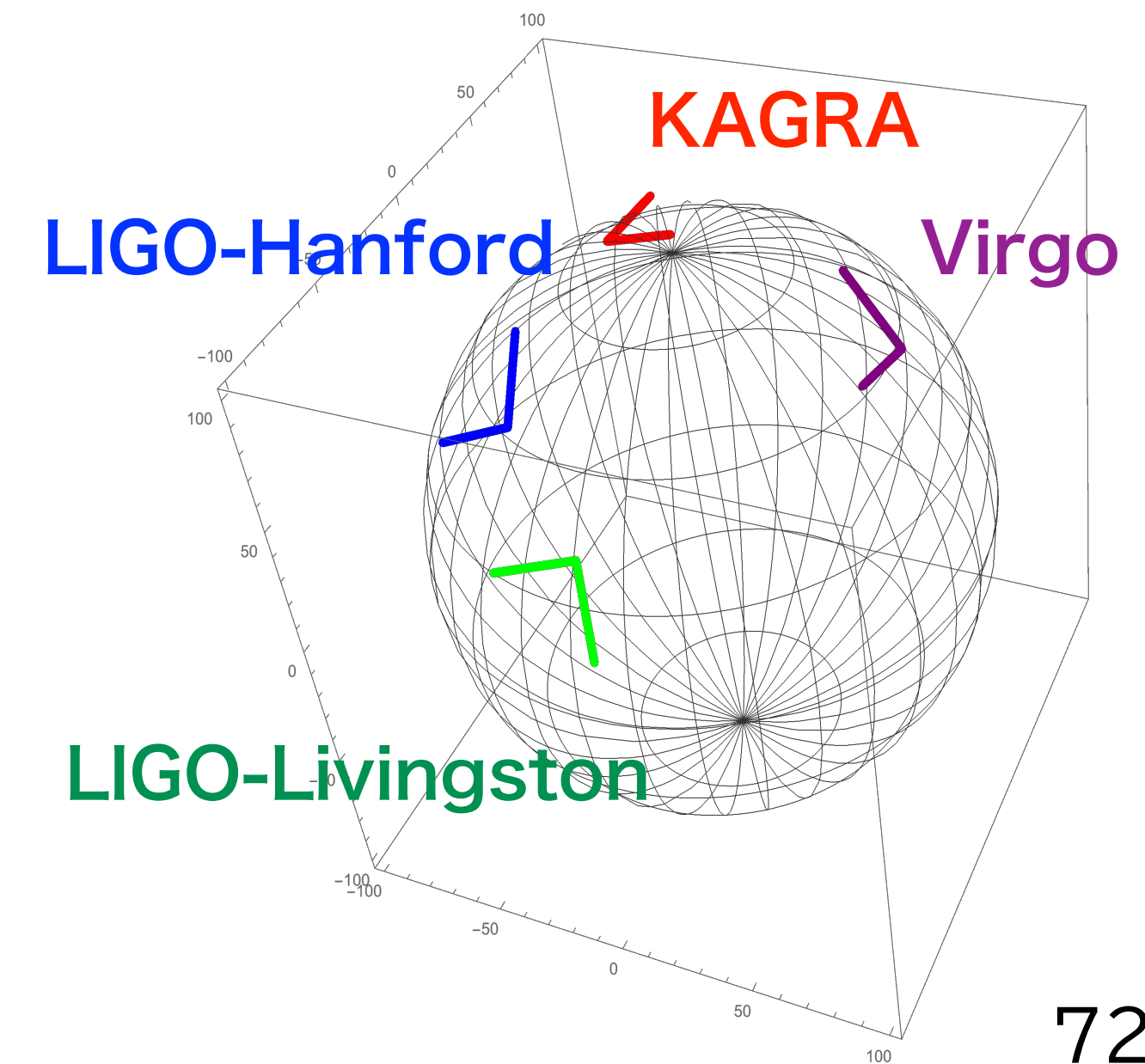
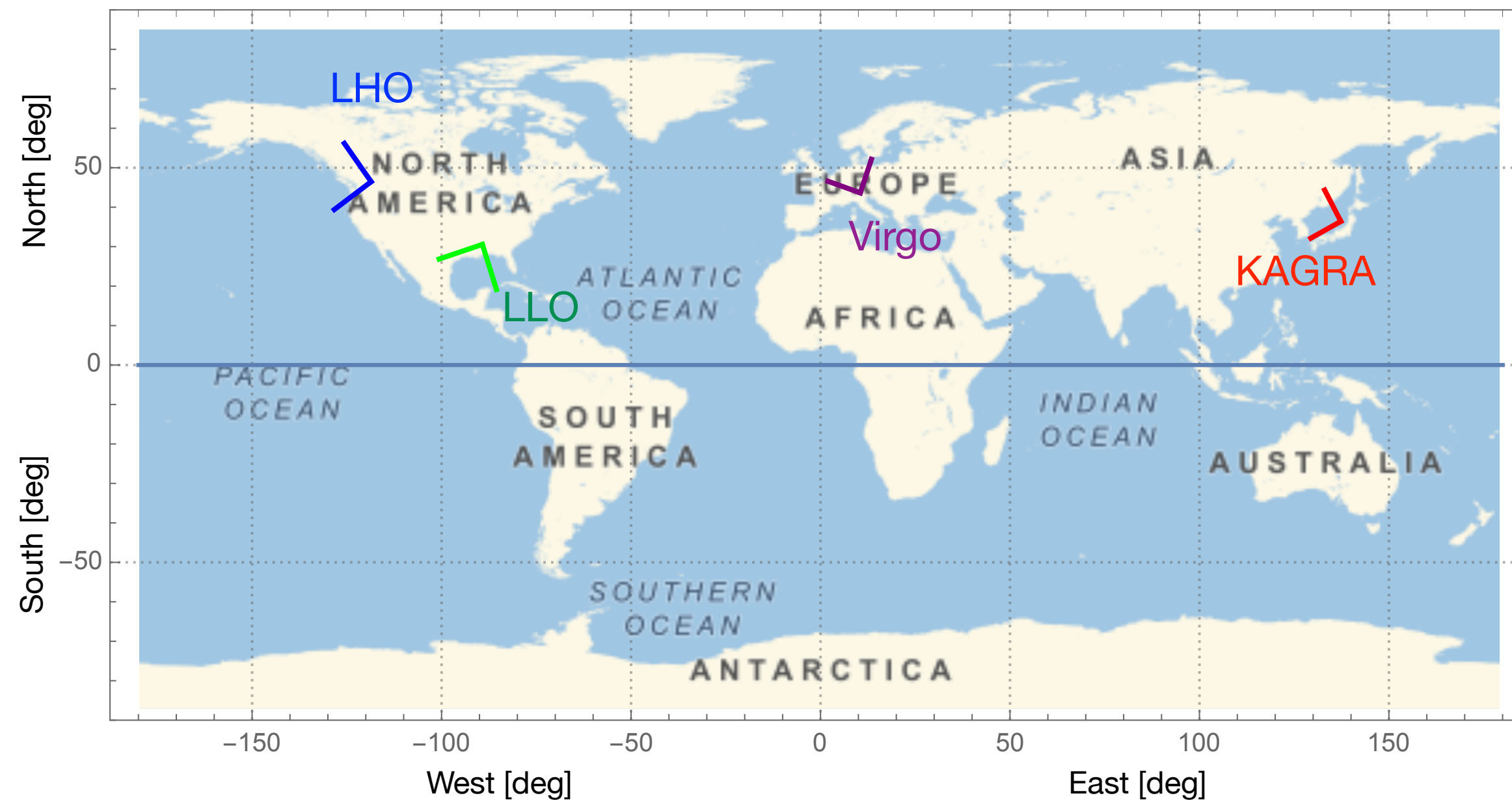
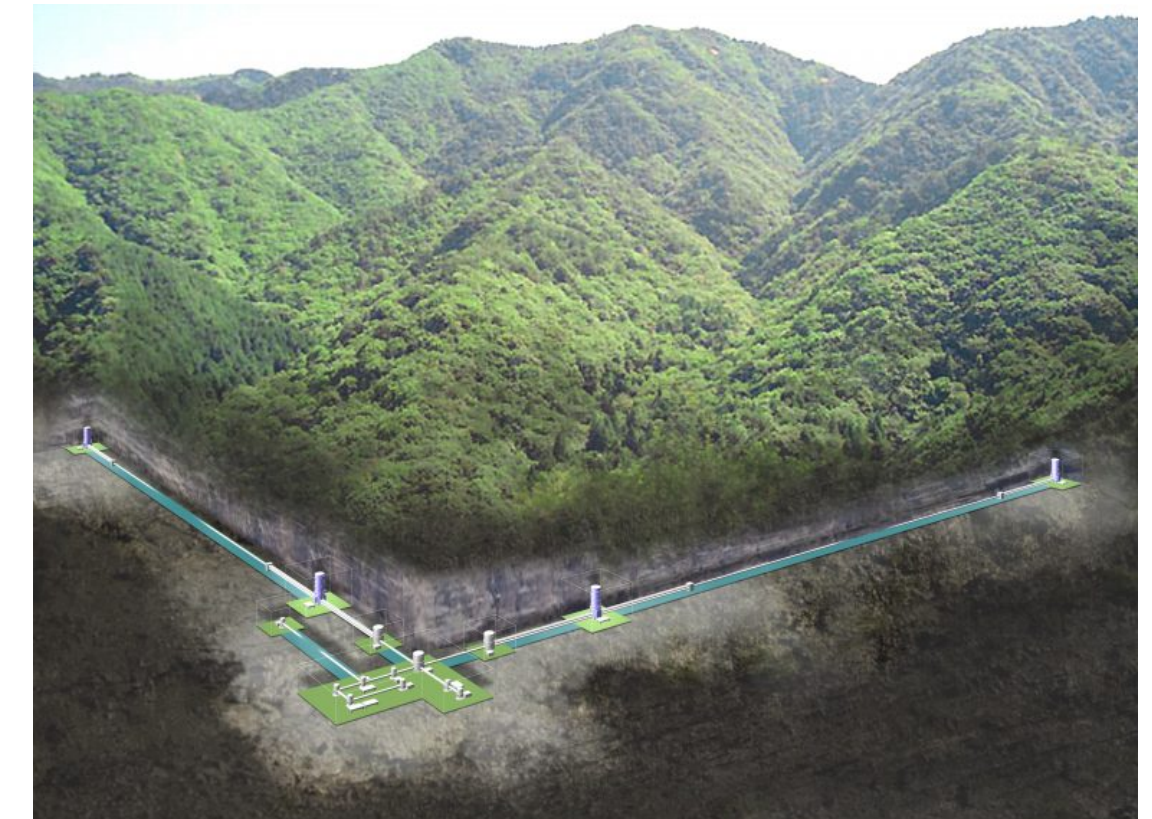
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)

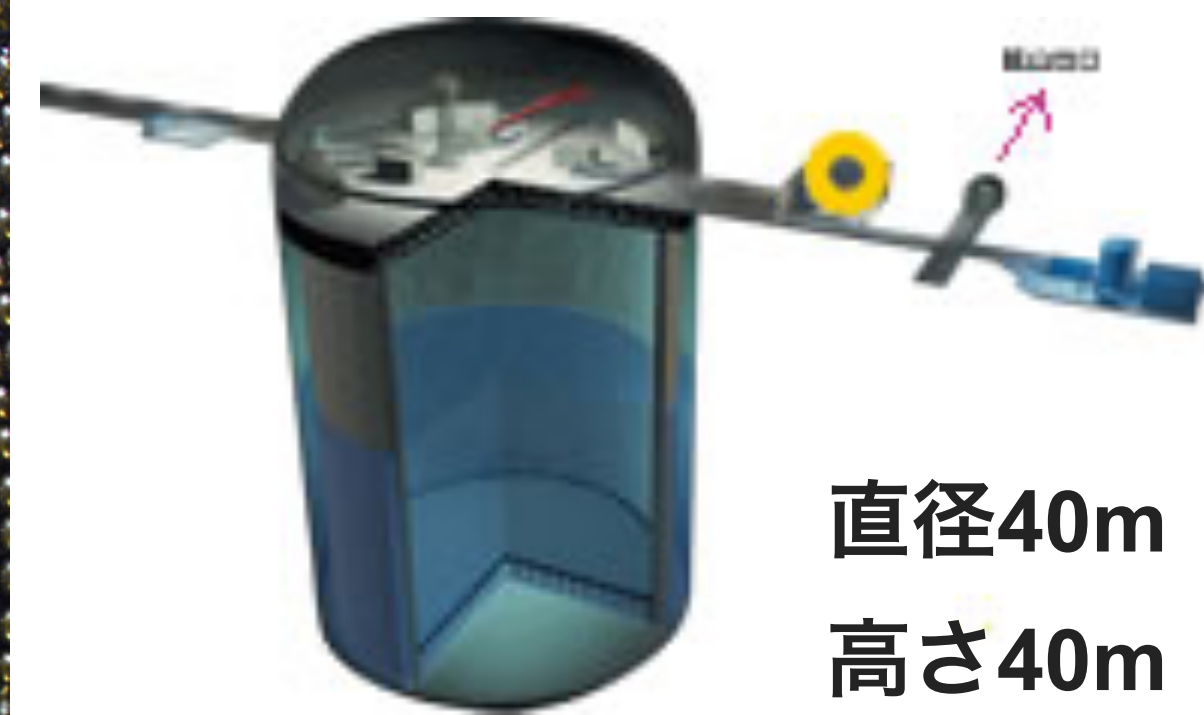
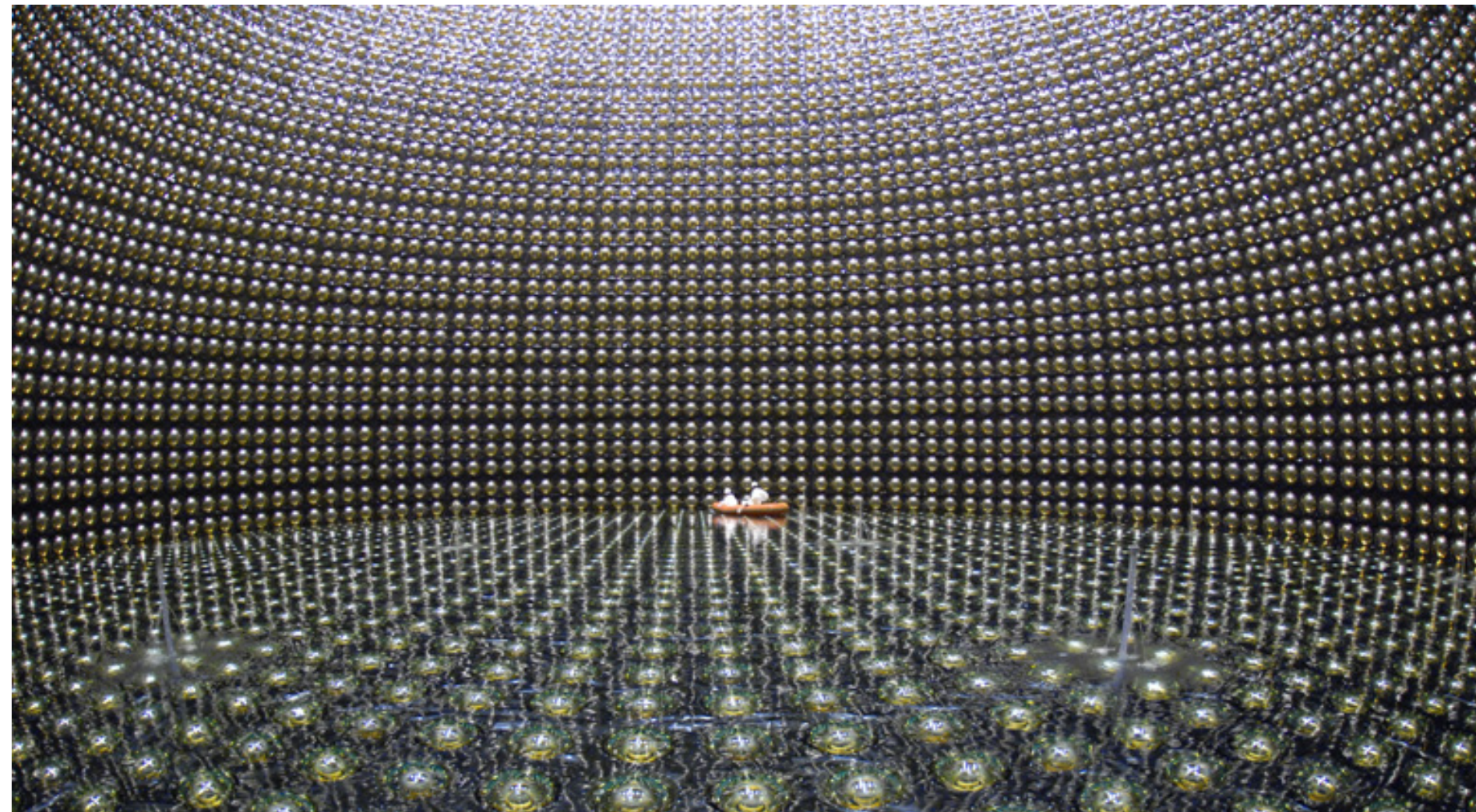




# スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

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)

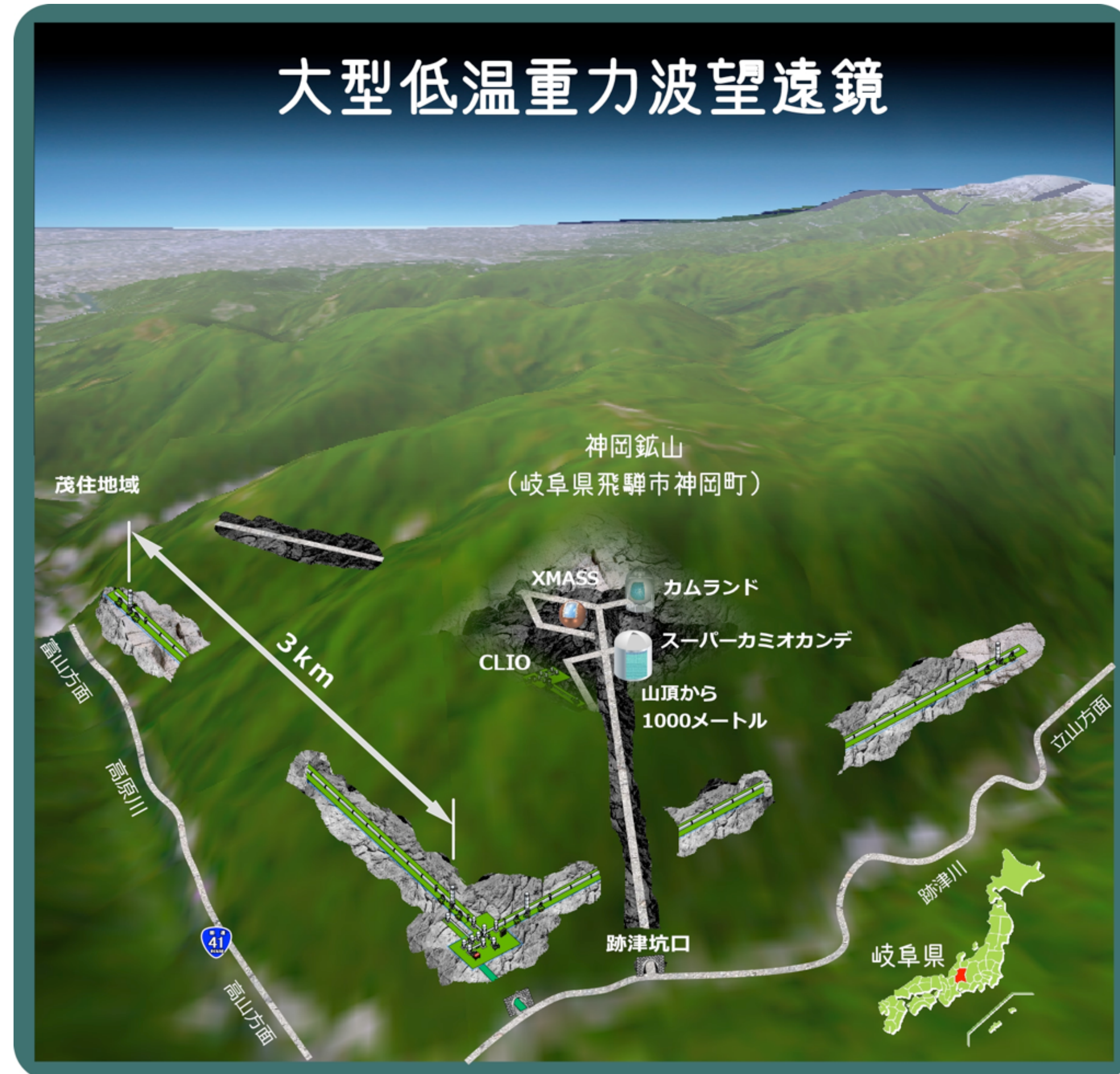
梶田隆章 (2015年)





# 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

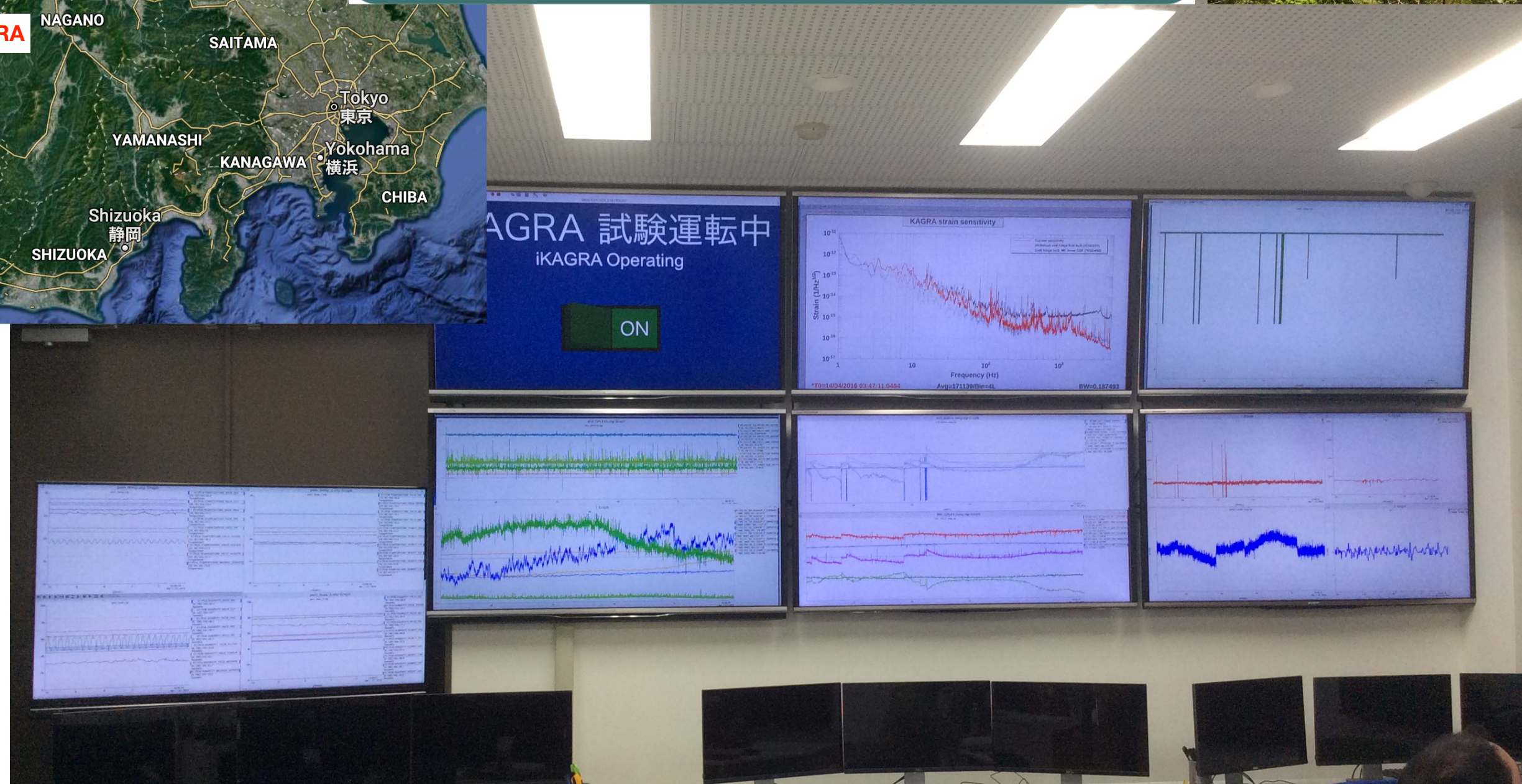
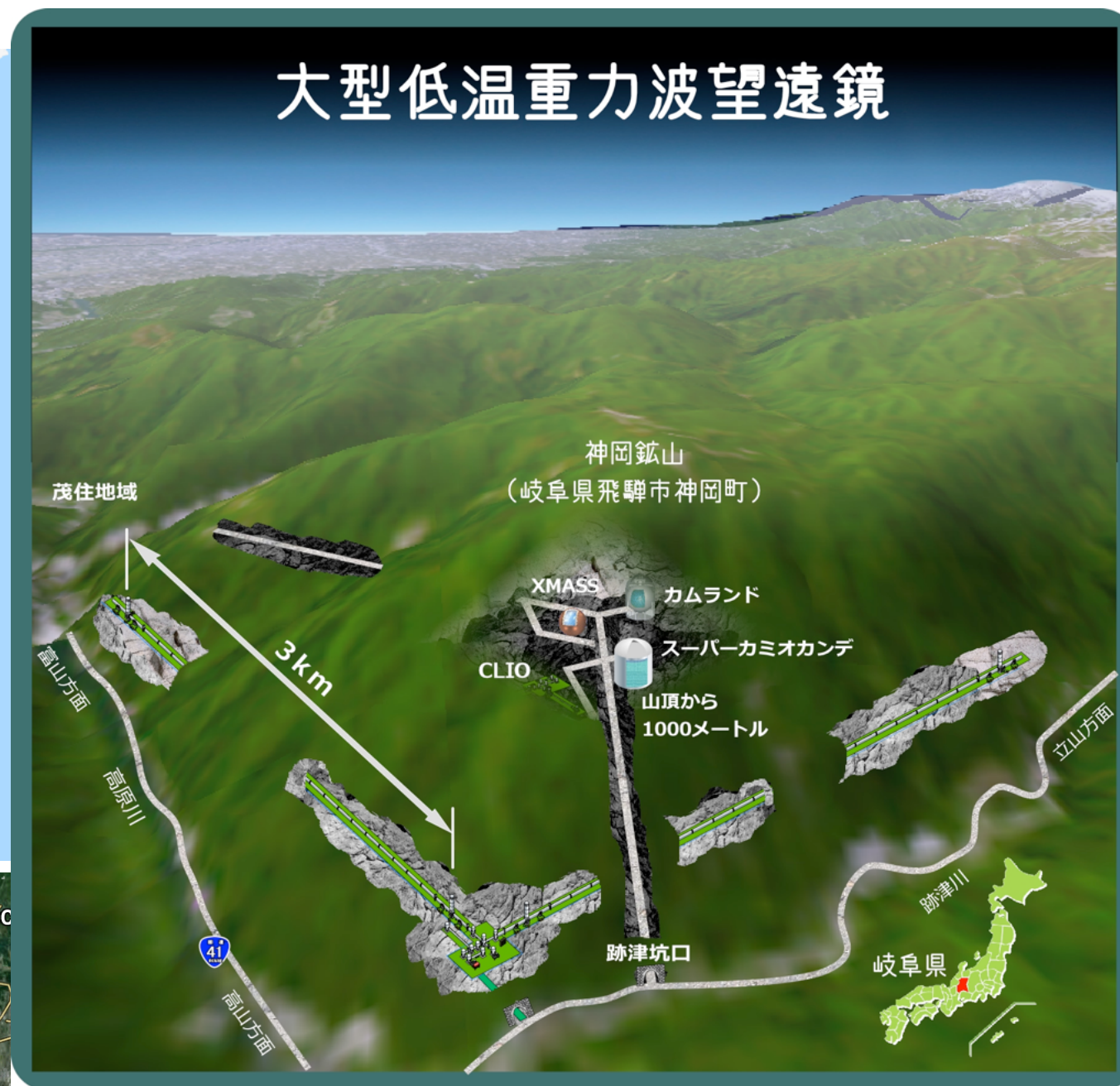
鏡の材質としてサファイア

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)



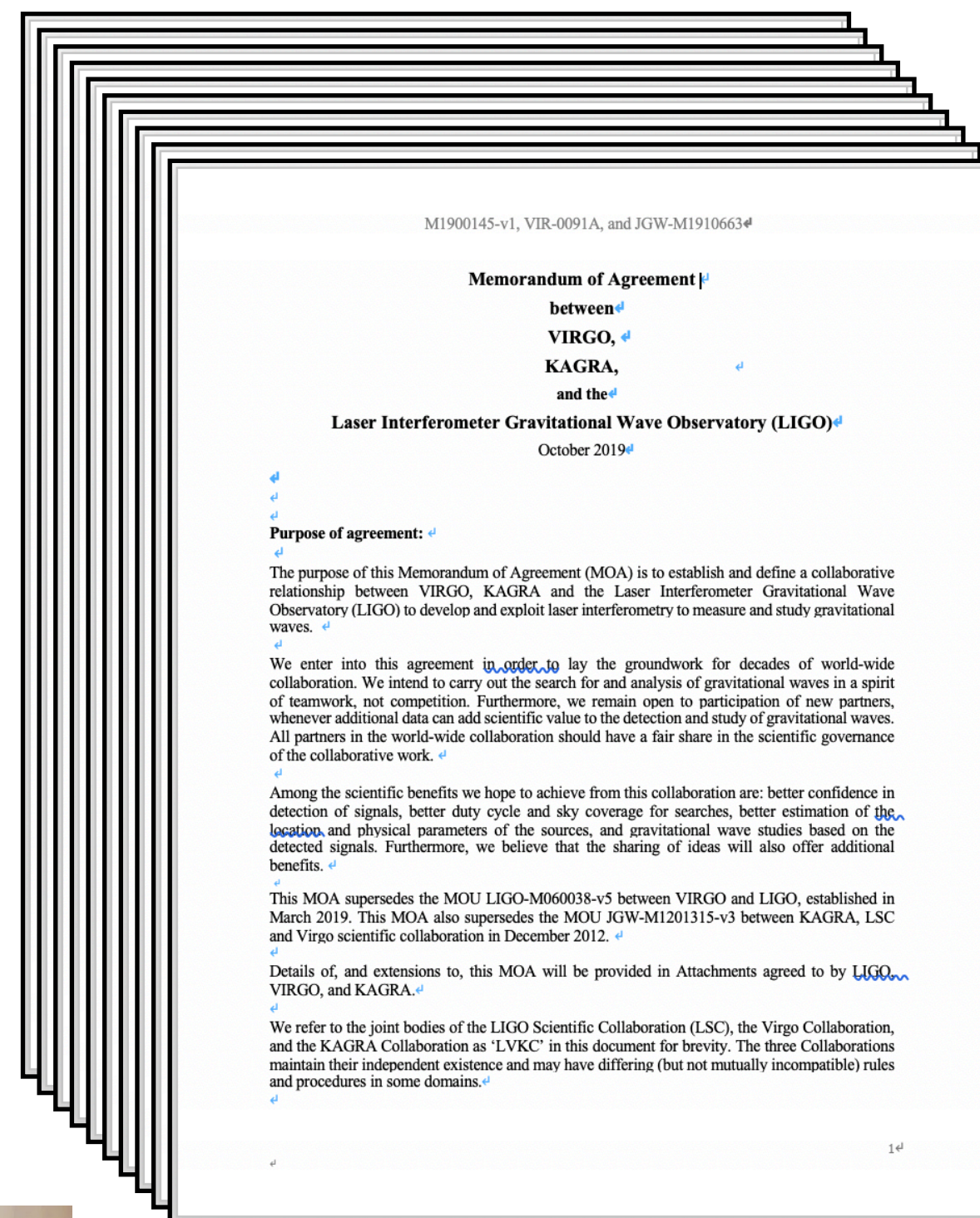


# KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)





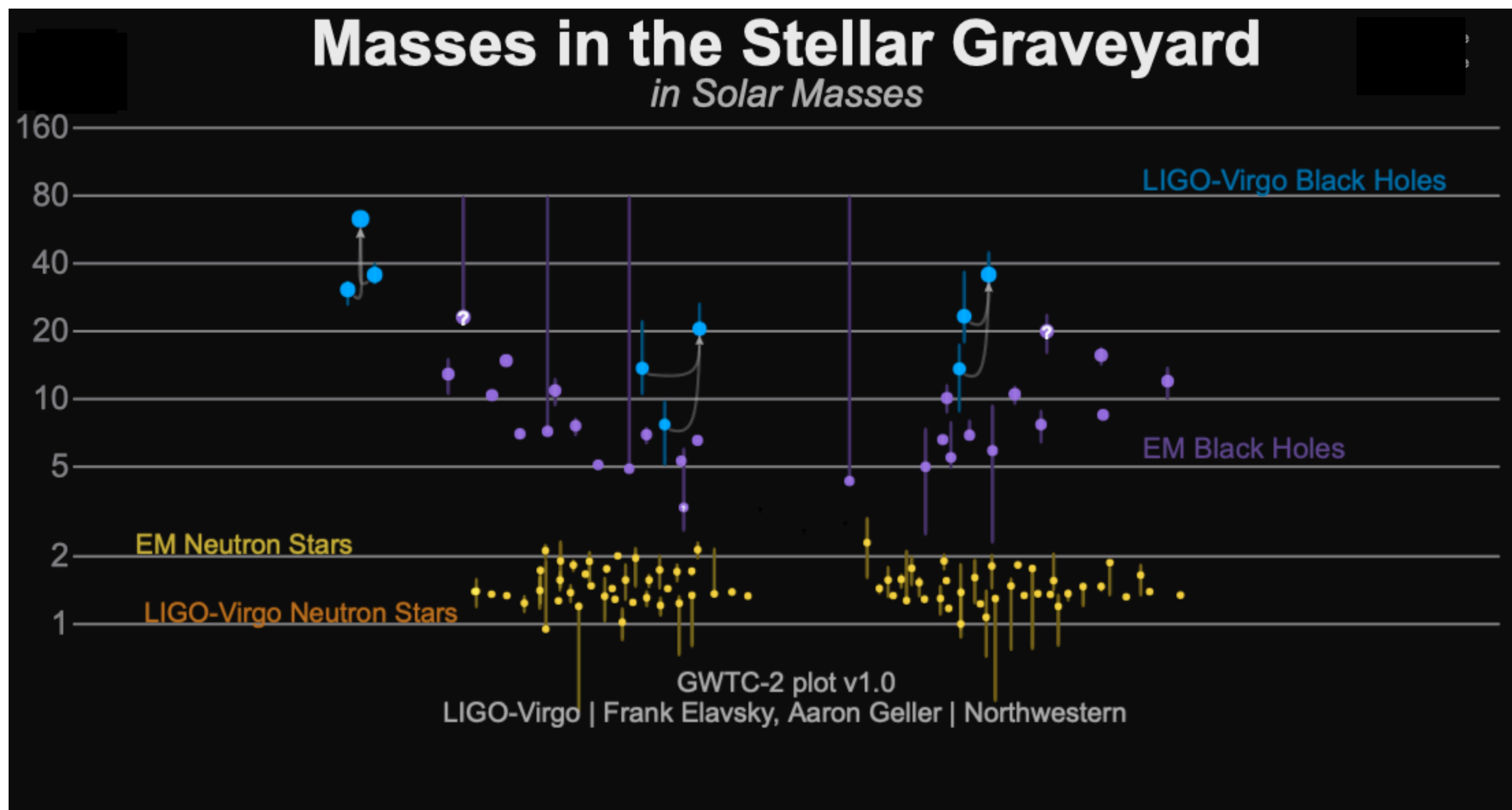
# KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの  
研究協定に調印



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

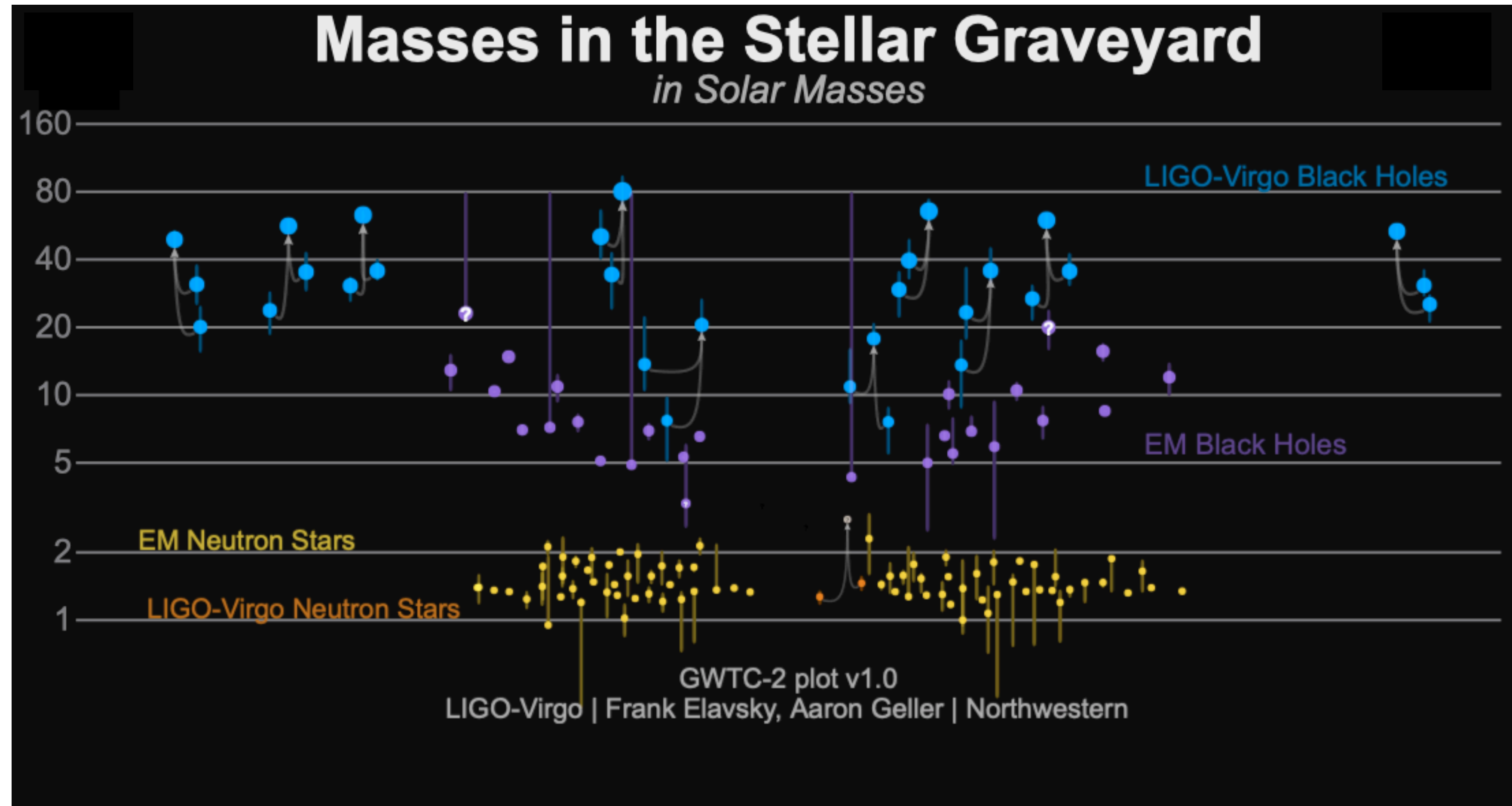


3 BHBH

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>





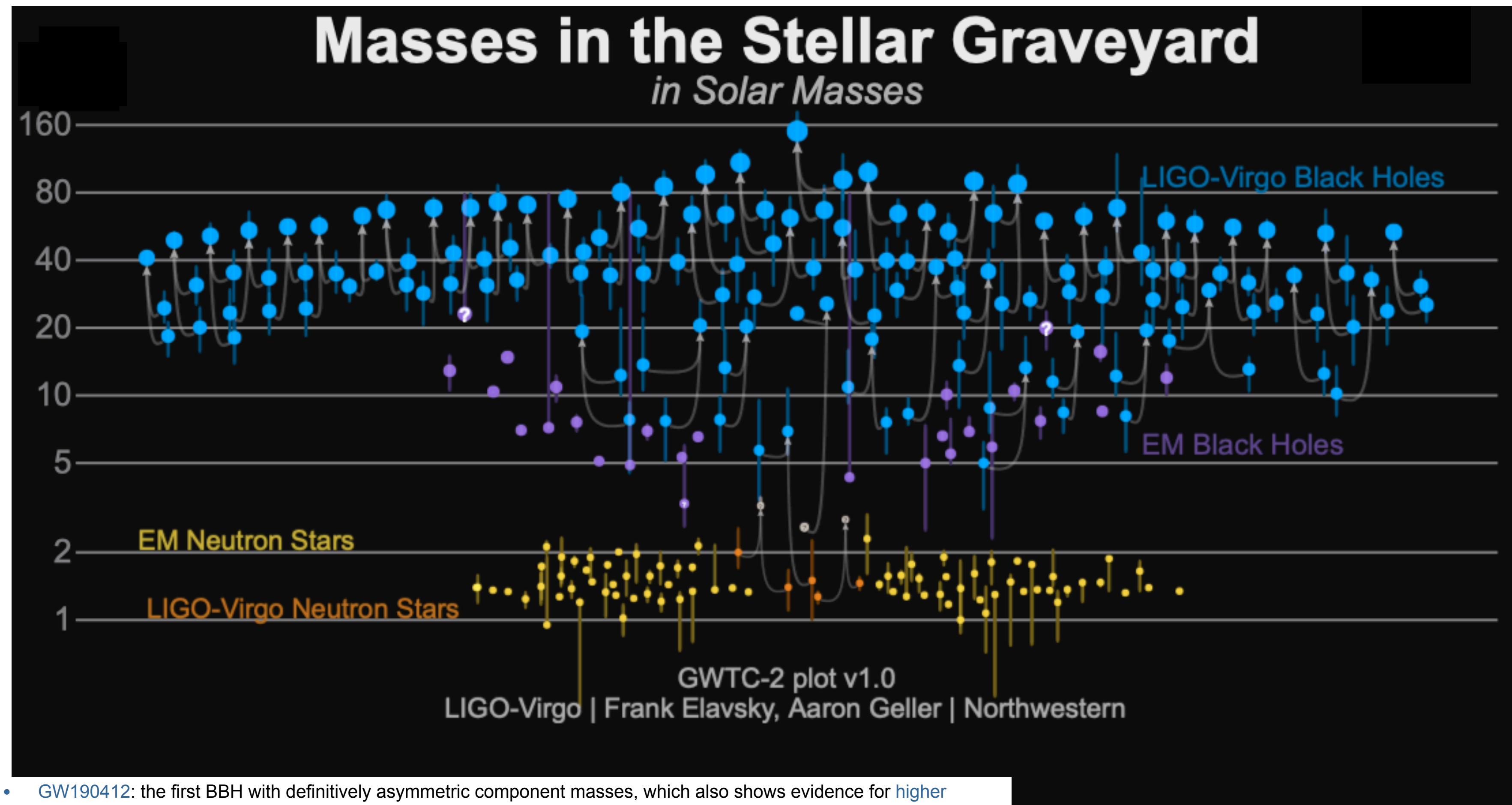
- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic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

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

10 BHBH

1 NSNS





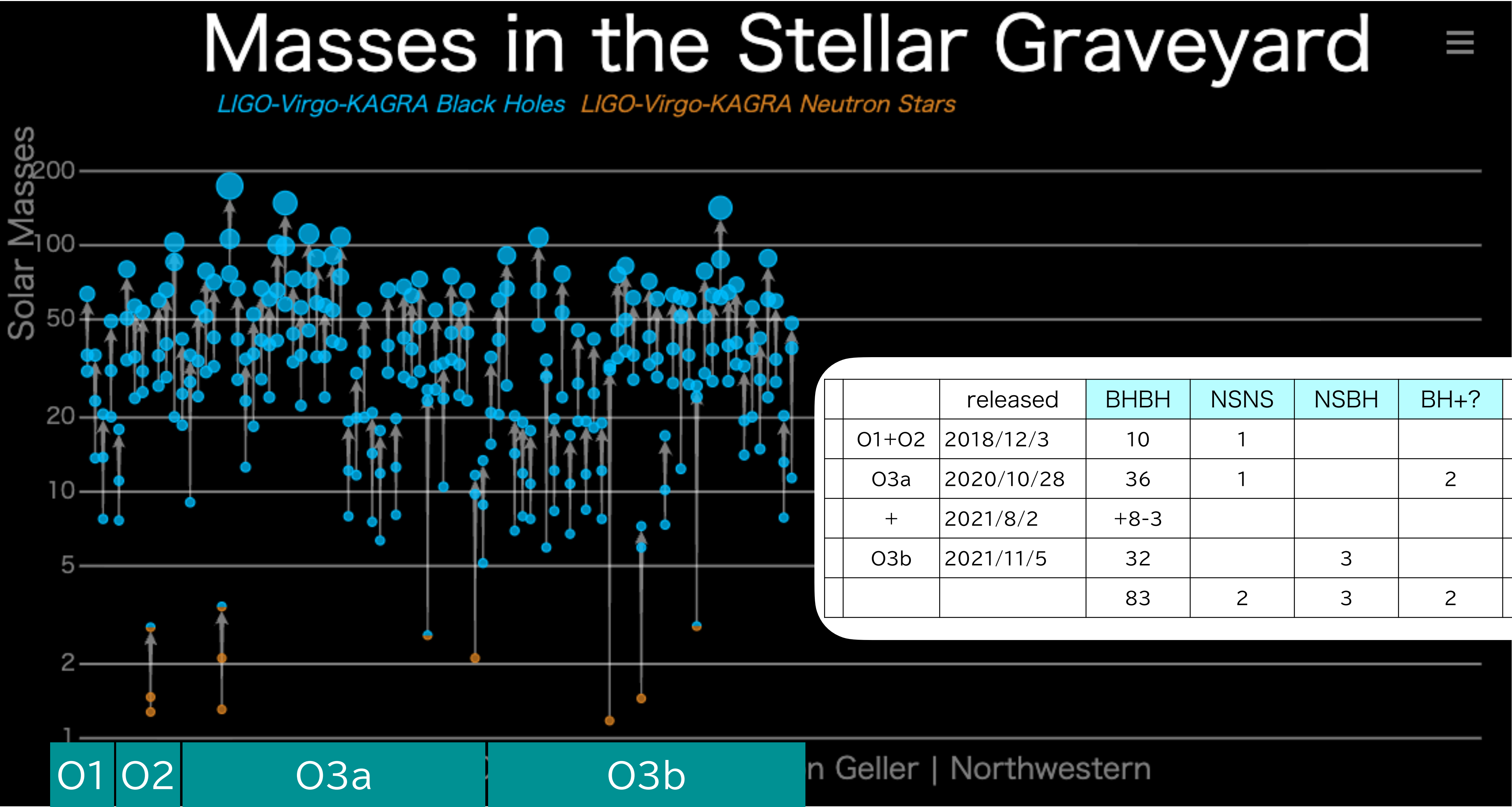
- [GW190412](#): the first BBH with definitively asymmetric component masses, which also shows evidence for [higher harmonics](#)
- [GW190425](#): the second gravitational-wave event consistent with a BNS, following [GW170817](#)
- GW190426\_152155: a low-mass event consistent with either an NSBH or 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+?



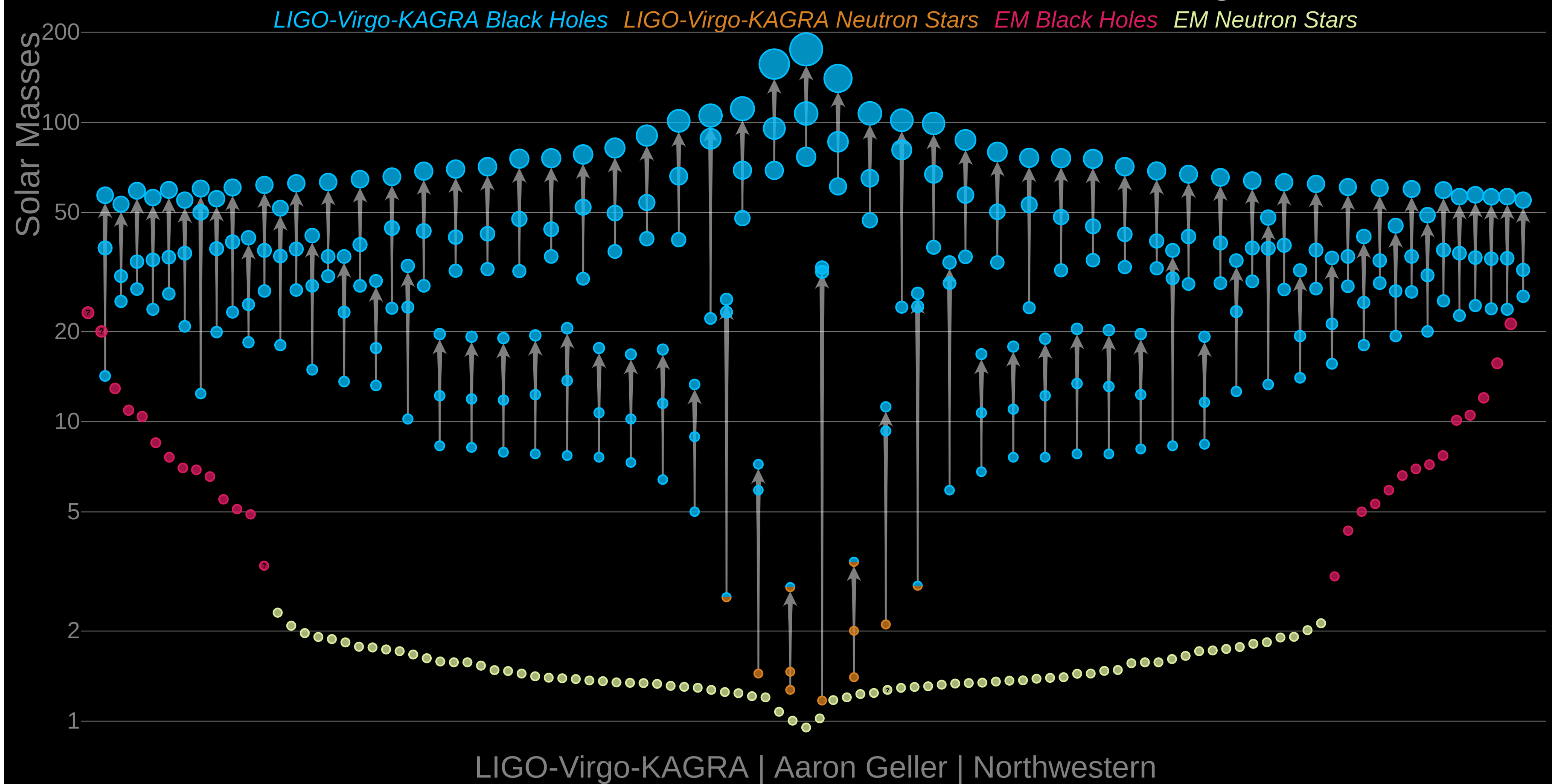




O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

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

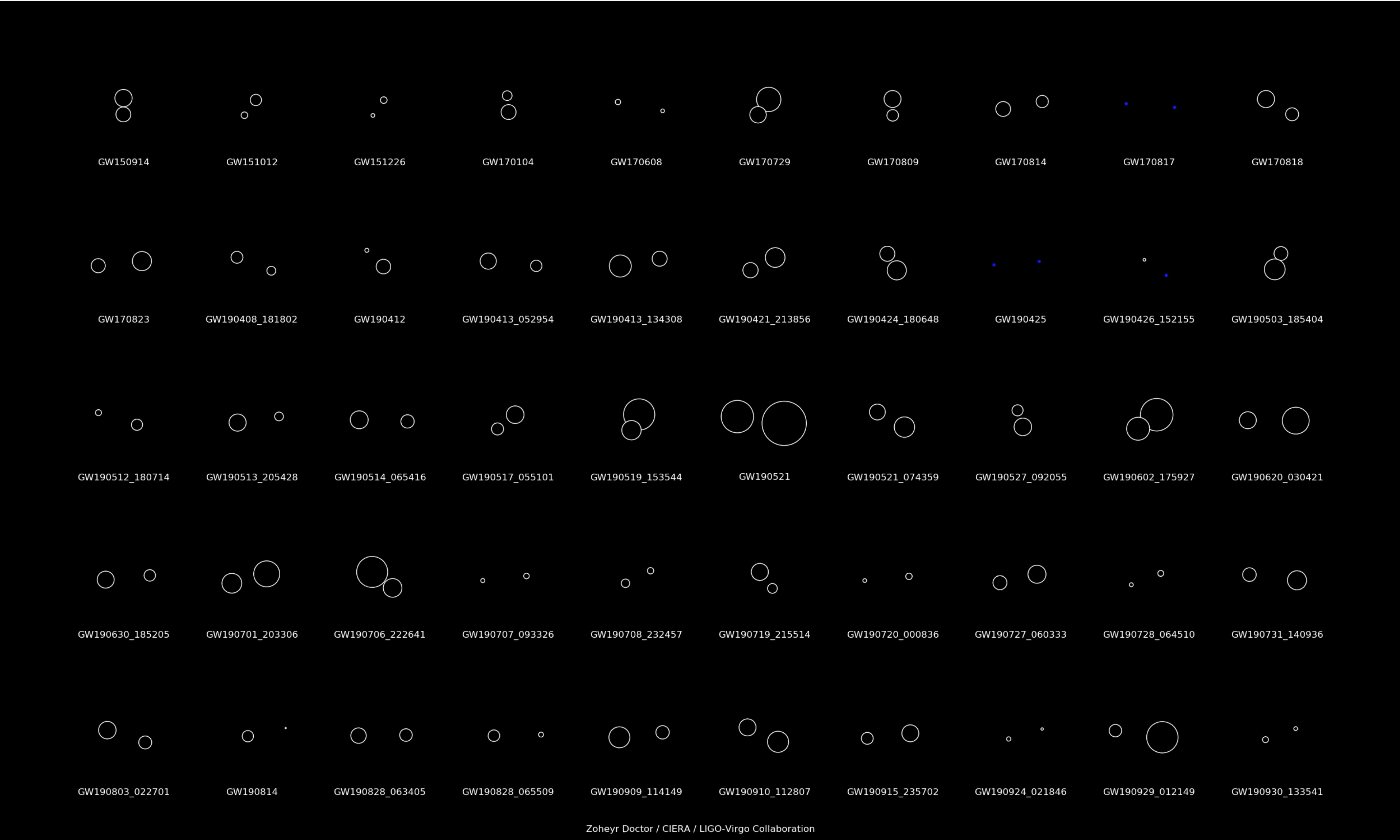
# Masses in the Stellar Graveyard





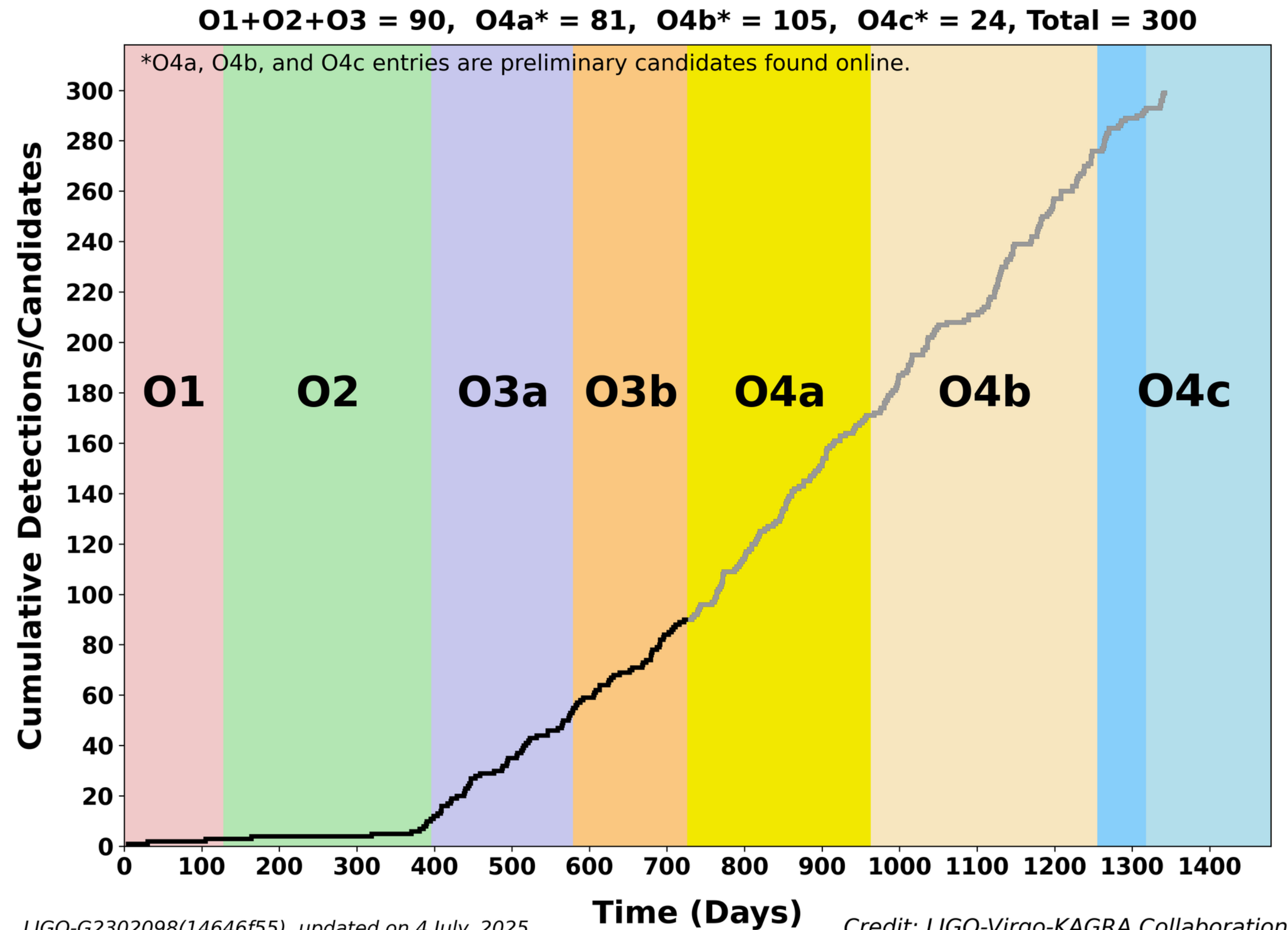
O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

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





# 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/>

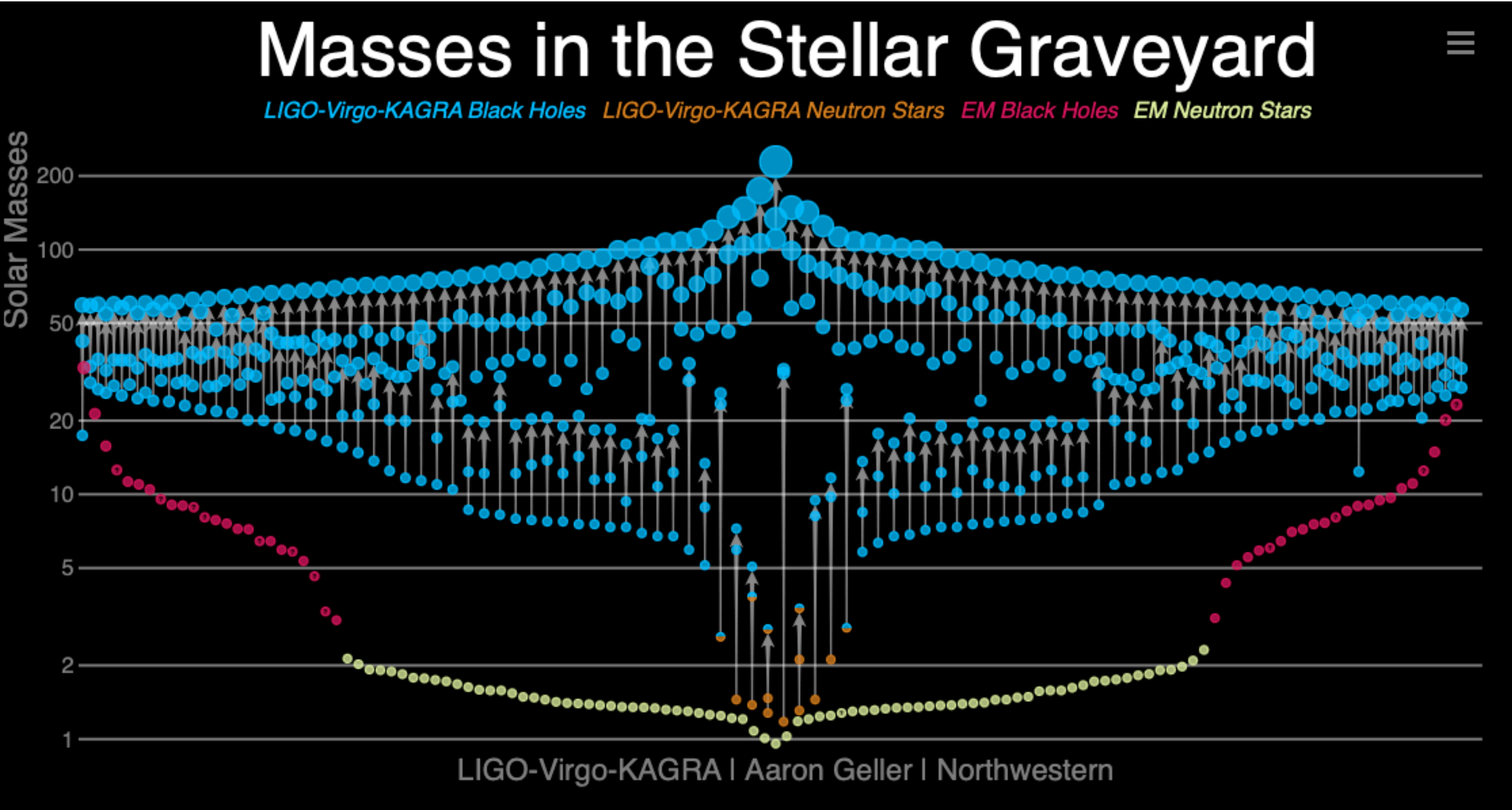


# 観測史上最大質量の連星ブラックホール合体を論文発表

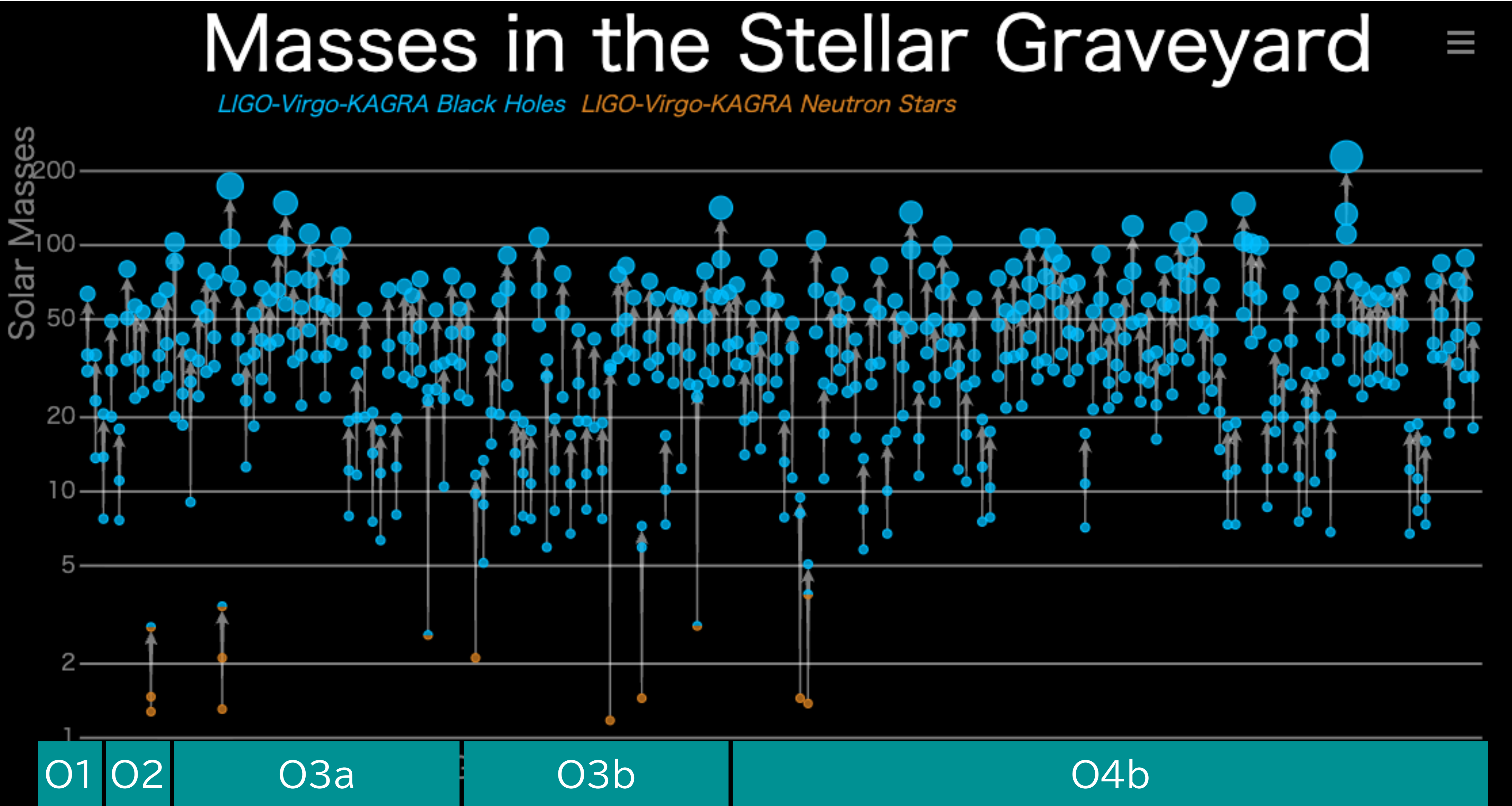


LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、これまでの観測で最大質量となる連星ブラックホール合体からの重力波観測を報告しました。上図は、プレスリリースに使われたものです。 [https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123\\_Japanese.pdf](https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123_Japanese.pdf)

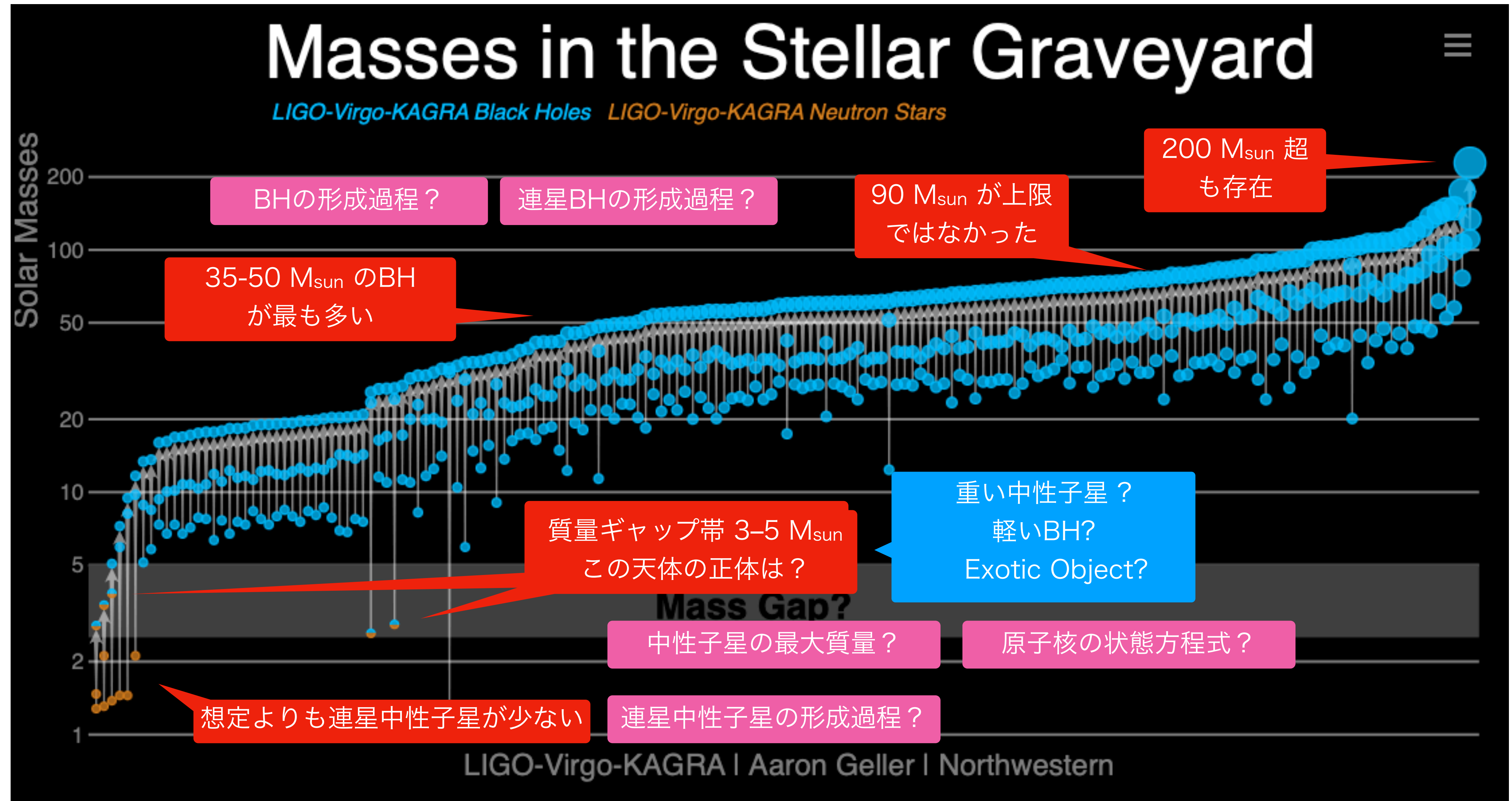






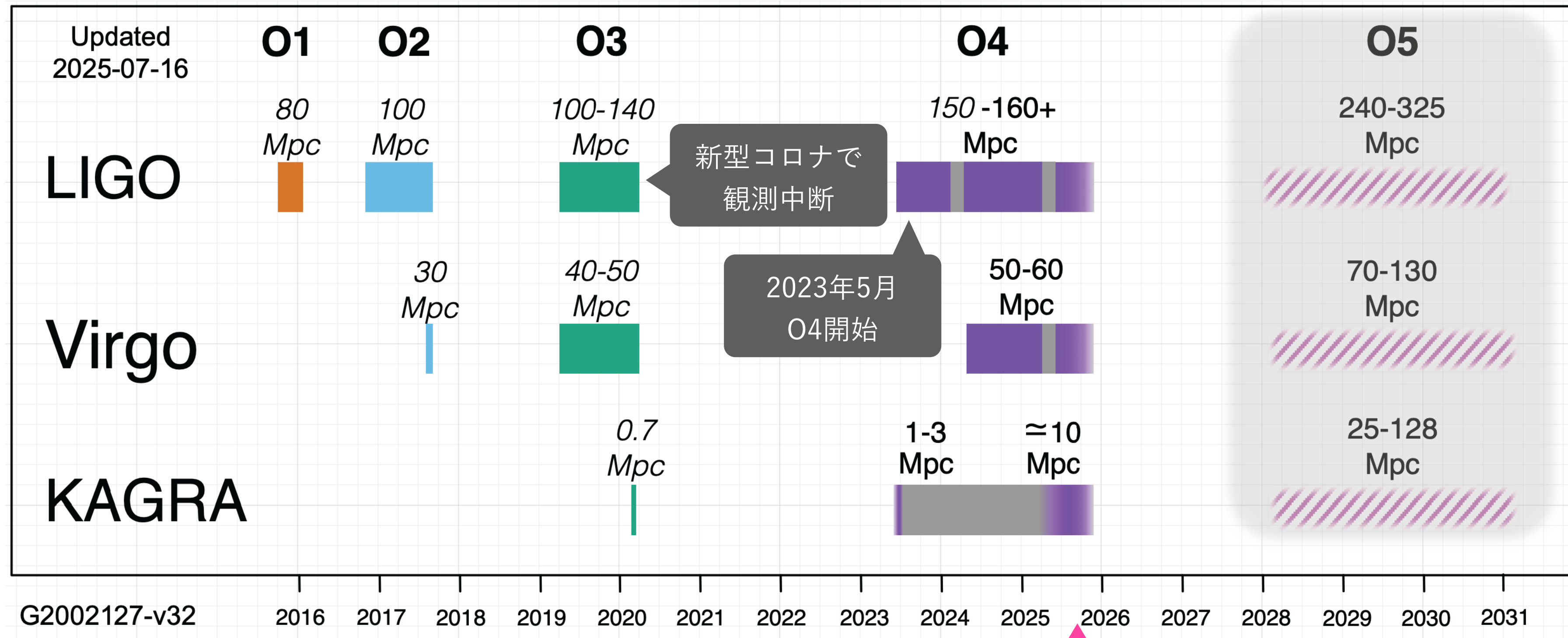








# 観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4)



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

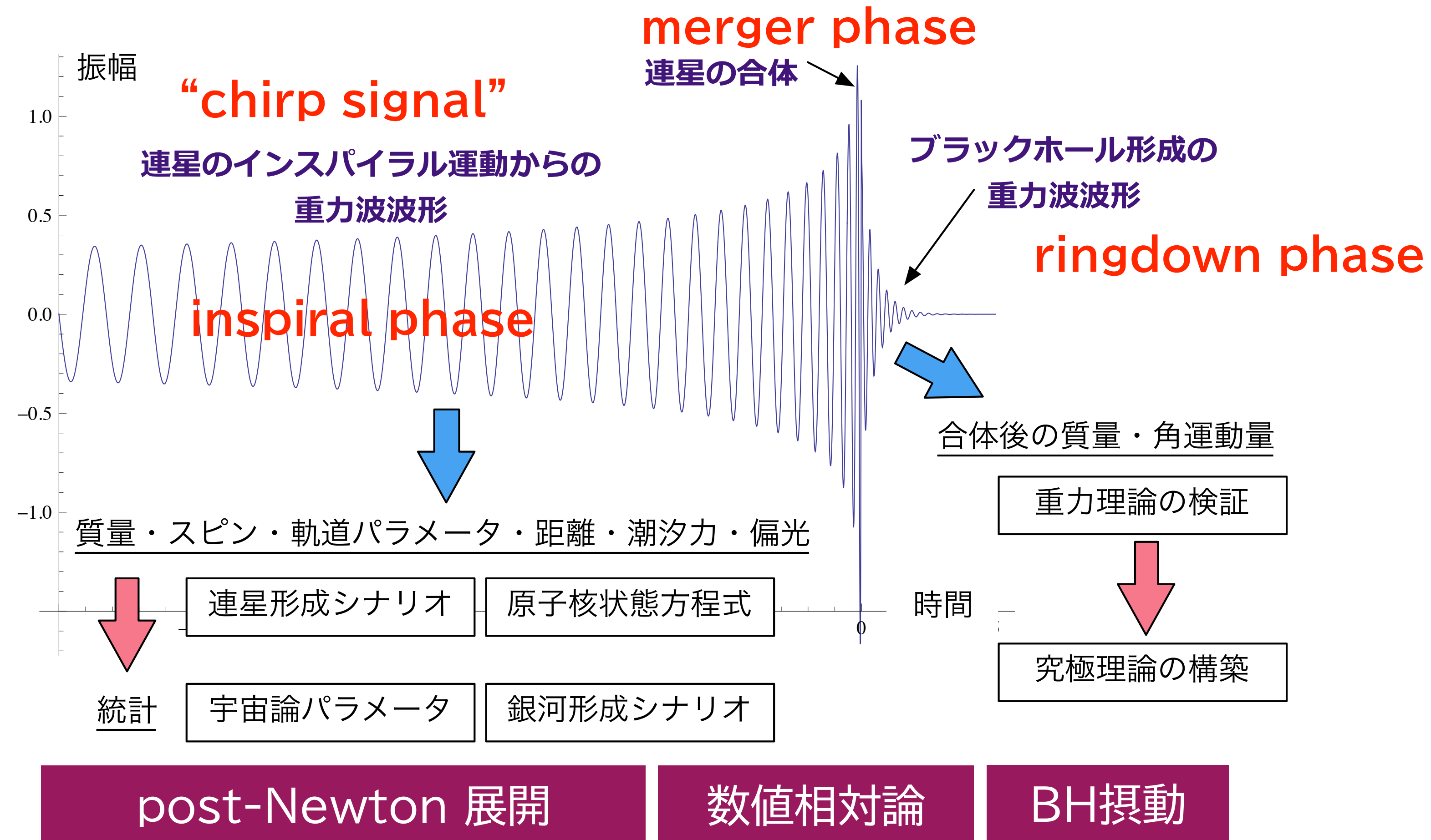
Today

GWTC-4  
2025/8/26

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



# 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



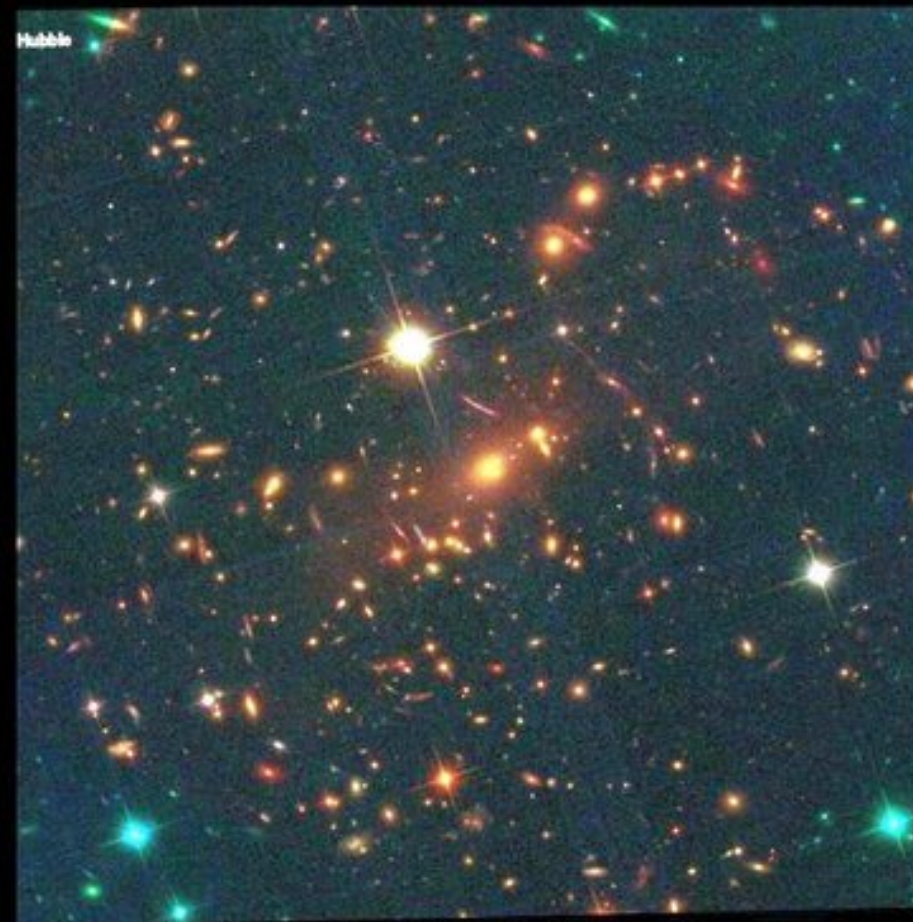
# 重力波の初観測から10年, 非常に明確なGW250114を報告

重力波がはじめて観測されたのは, 2015年9月14日のことでした. GW150914と名付けられた重力波は, 連星ブラックホールの合体が存在することを初めて示した現象でもありました. LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは, 10周年となるのを記念して, 今年1月に発見された, 非常に明確に捉えられた重力波GW250114の現象を報告しました.

下の図は, GW150914と, GW250114の重力波の波形とスペクトログラム(横軸時間, 縦軸周波数)です. 色の濃いほどクリアな波形を示します. どちらも同じ程度の質量のブラックホール合体が, 同じような距離で発生したもののですが, 10年経った今, 干渉計の感度が向上したことと, ノイズ除去技術の進展によって, 信号対雑音比が3倍近く向上しました. (上の図は, ハッブル望遠鏡の写真とジェームス・ウェブ望遠鏡の写真の比較です. どちらも宇宙空間の望遠鏡から同じ天体を撮影したもののですが, 右の方がクリアですね)

## A New Perspective on the Universe

Hubble Space Telescope (2017)



NASA, ESA, CSA, and STScI

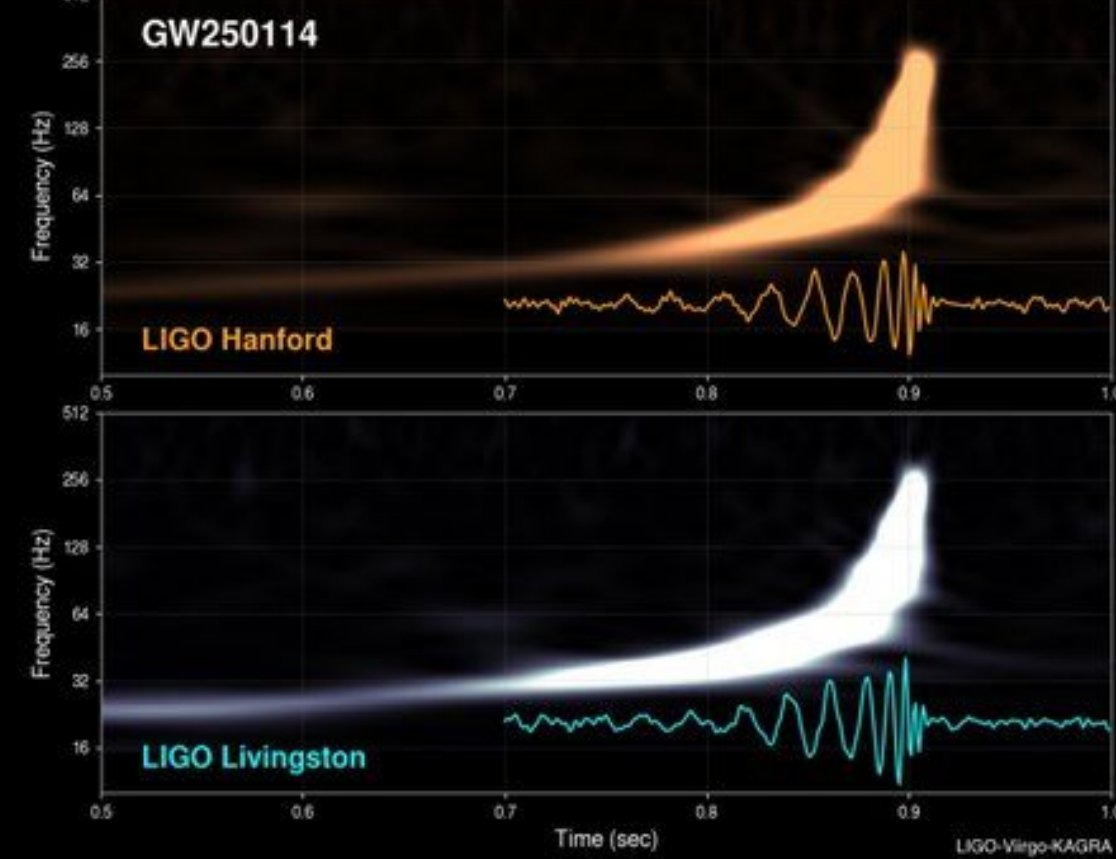
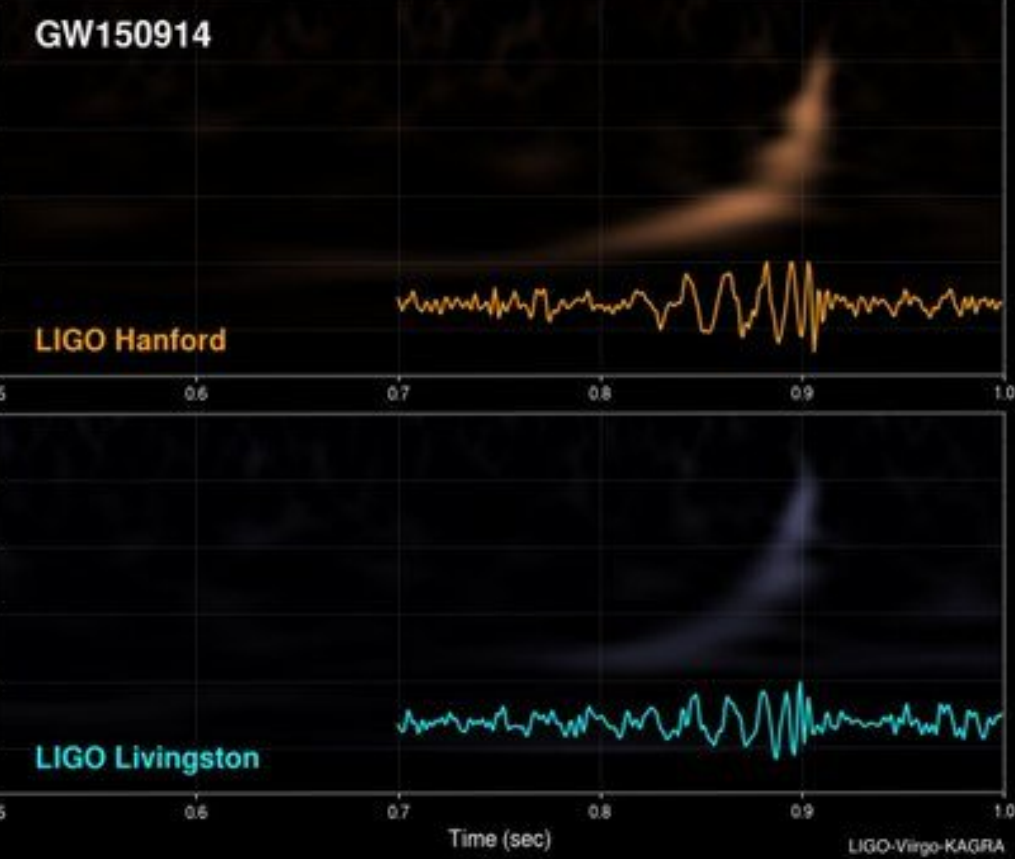
James Webb Space Telescope (2022)



NASA, ESA, CSA, and STScI

LIGO - First Observing Run (2015)

LIGO - Fourth Observing Run (2025)





# 明確なGW250114で、一般相対性理論を検証

非常に明瞭な重力波として観測されたGW250114を用いて、LIGO-Virgo-KAGRAグループは、2つの検証結果を報告しました。

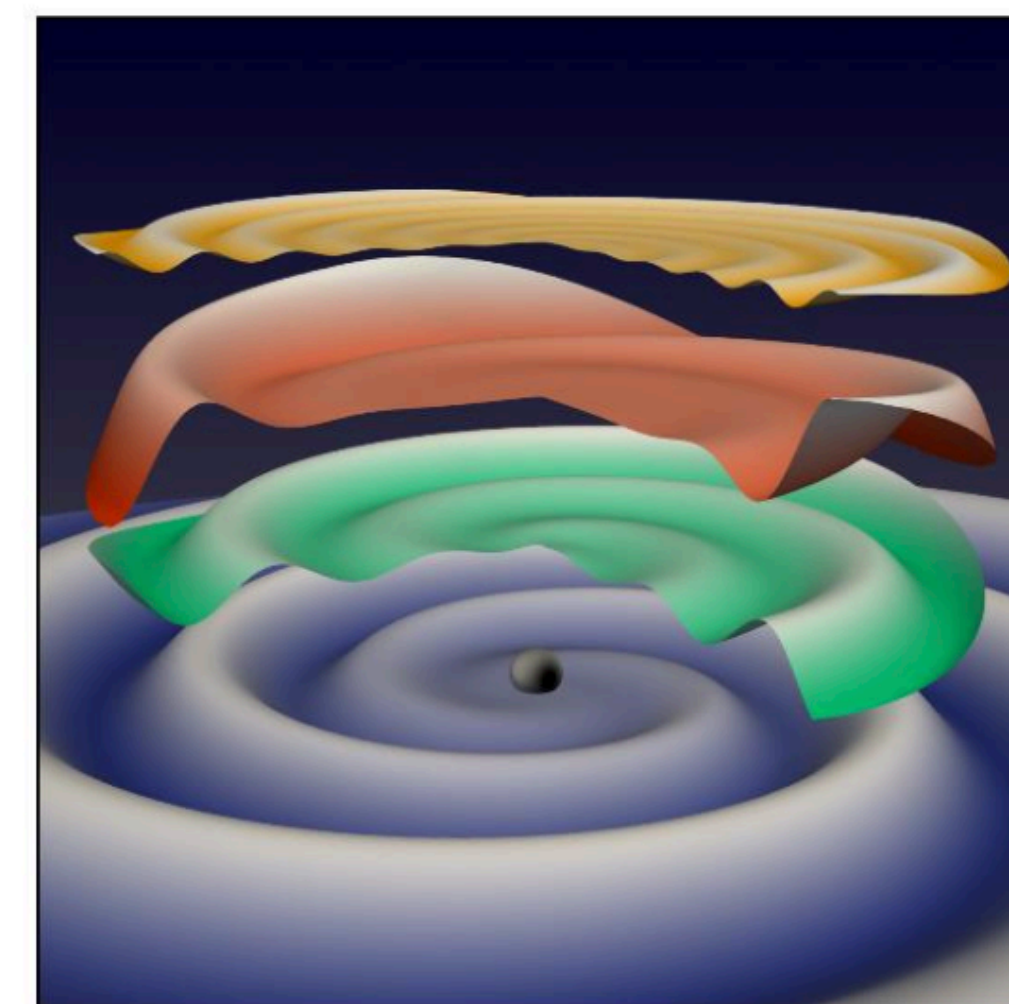
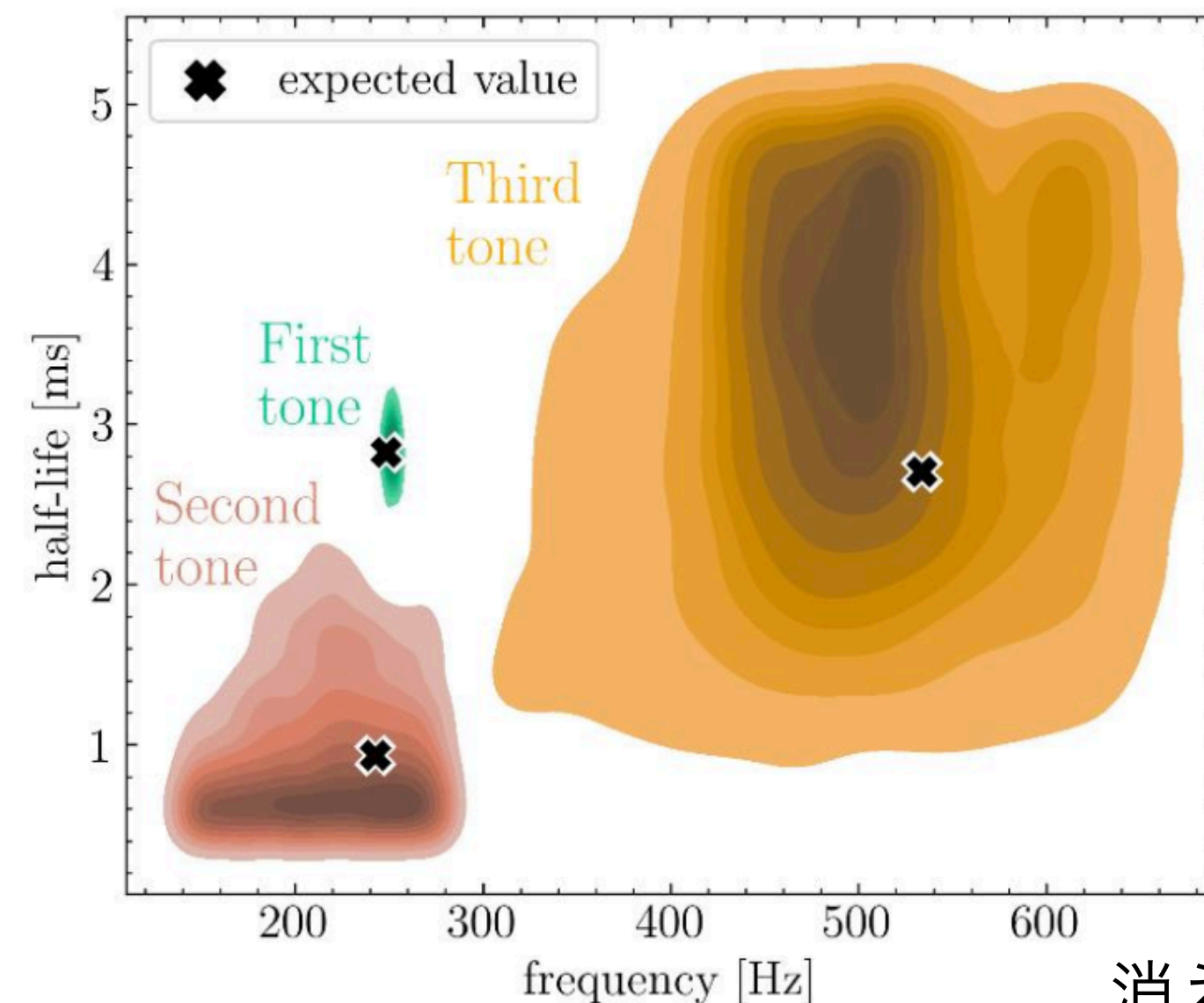
1つは、ブラックホールの表面積はエントロピーと解釈できる、とするホーキングとベッケンシュタインの理論の検証です。何でも飲み込むブラックホールは、単調に増加するエントロピーと類似して理解されますが、実際に2つのブラックホールの合体前後の大きさを算出すると、合体後は単純な和よりも大きくなっていることが確かめられました。

もう1つは、合体直後の重力波が予想されるモードの重ね合わせになっていた、というものです。ブラックホールの合体後には、急速に減衰する重力波になります。鐘の響きが次第に収まっていく状況です。ブラックホールの質量と回転の大きさから、相対性理論を使ってどのような振動数の重力波が、どのような減衰時間で見られるかが予想されますが、今回はじめて3つのモードが観測され、それらが理論予測と一致していることが示されました（下図左）。

GW250114 検出報告 日本語解説



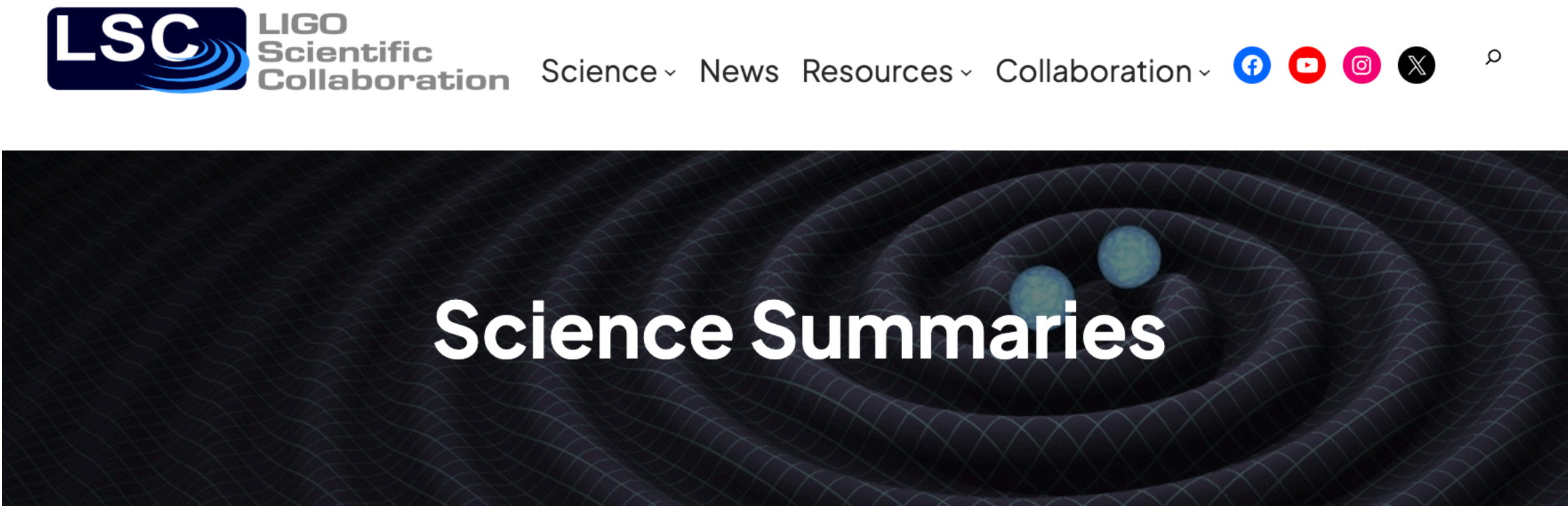
GW250114 相対性理論検証報告 日本語解説



消えゆく重力波を3つの重ね合わせで示した図



<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

- ▼ **Searching for elusive ultralight dark matter**  
2025-11-07 PDF: [\[en\]](#) [\[ja\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **Probing the Universe for persistent gravitational waves**  
2025-10-29 PDF: [\[en\]](#) [\[ja\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **GW241011 and GW241110: A pair of rapidly spinning, unequal mass black hole mergers detected with gravitational waves**  
2025-10-28 PDF: [\[en\]](#) [\[ja\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **Can we detect gravitational waves from vector boson clouds?**  
2025-09-10 PDF: [\[en\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#) **ja = 日本語**
- ▼ **Black hole spectroscopy and tests of general relativity with GW250114**  
2025-09-10 PDF: [\[en\]](#) [\[ca\]](#) [\[es\]](#) [\[gl\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#)
- ▼ **GW250114: Cosmic carillon of chaos**  
2025-09-10 PDF: [\[en\]](#) [\[da\]](#) [\[el\]](#) [\[es\]](#) [\[gl\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#) [\[zh-Hant\]](#)
- ▼ **GW230814: A loud gravitational-wave signal detected by LIGO Livingston**  
2025-09-09 PDF: [\[en\]](#) [\[es\]](#) [\[hi\]](#) [\[it\]](#) [\[ja\]](#) [\[ta\]](#)
- ▼ **New constraints on the cosmic expansion and general relativity with gravitational waves**  
2025-09-08 PDF: [\[en\]](#) [\[ca\]](#) [\[ja\]](#) [\[pt\]](#)

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。



# Sの科学 Yの科学

## Sの科学

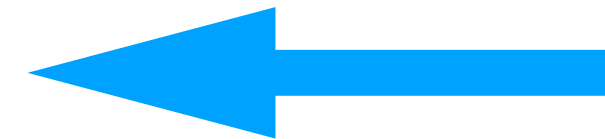
physic**s** 物理  
mathematic**s** 数学  
statistic**s** 統計学  
genetic**s** 遺伝学

## 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

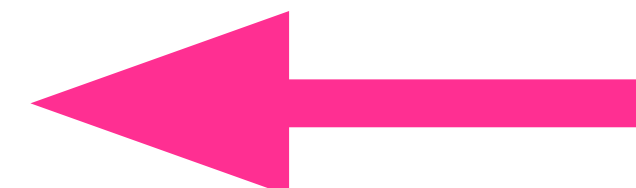


ブラックホール

膨張宇宙

重力波

宇宙物理学





重力波 2025-0825v4 版 田中・真貝 作成  
8 月に出た初校に対する修正箇所・追記箇所を赤字で示す

| 重力波の生成機構 一般相対性理論によれば、大質量でコンパクトな天体が加速度運動することにより、重力波が発生する。重力波源としては連星の合体や超新星爆発、非球対称な星の高速回転や、宇宙初期に起源をもつ重力波が宇宙空間を伝播していると考えられる。これらのうち、データとの相関解析を可能にする波形予測ができるのは、連星合体からの重力波である。十分に合体前はニュートン力学に相対論補正を加えたポスト・ニュートン展開により、合体前後は数値シミュレーションにより、合体後ブラックホールが生じる場合にはブラックホール時空の摂動によっても波形モデルが得られる。これらのモデルと重力波干渉計で得られる信号の相関をとることで、連星ブラックホール（以下 BBH）や連星中性子星（BNS）、および中性子星・ブラックホール連星（NSBH）の合体現象による重力波の検出、および、パラメータ推定が 2015 年以来可能になった。 |               |                     |                |              |                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|----------------|--------------|-------------------------------------|------------|
| 重力波の観測 これまでに、米欧のレーザー干渉計 LIGO, Virgo によって、 <b>O4a</b> と呼ばれる観測期間終了までに、BBH 波源の重力波が <b>169</b> 例、BNS 波源が 2 例、NSBH 波源が <b>3</b> 例、片方が BH で相方が不明なもの 1 例、 <b>片方が NS で相方が不明なもの 1 例 の合計 176 例が、波源のパラメータを含めて</b> 報告されている。日本の KAGRA（かぐら）も O3b の最後に共同観測に入った。KAGRA は能登半島地震でのダメージから復帰して 2025 年 6 月に観測を再開した。O4 観測は、2025 年 11 月まで行われ <b>た</b> 。その後、世界中の干渉計は精度向上のためのアップグレードを行い、O5 観測は 2028 年より行われる。                              |               |                     |                |              |                                     |            |
| 重力波イベントは、観測された年月日を用いて、GW150914 の形で命名される。O3a 期より、時分秒を加えた名称が正式となった。重力波イベントは速報体制が取られ、多波長電磁波追観測が可能になっているが、これまでに波源が特定されたのは GW170817 のみである。                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |                     |                |              |                                     |            |
| 重力波レーザー干渉計の位置と腕の向き<br>(例えば N 36° W は、北から西方に 36° の向きを指す。)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                     |                |              |                                     |            |
| 干渉計                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 所在地           | 腕長 (km)             | 緯度             | 経度           | X-腕                                 | Y-腕        |
| LIGO Hanford                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 米国            | 4                   | 46°27'19″ N    | 119°24'28″ W | N 36° W                             | W 36° S    |
| LIGO Livingston                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 米国            | 4                   | 30 33 46 N     | 90 46 27 W   | W 18° S                             | S 18° E    |
| Virgo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 欧州            | 3                   | 43 37 53 N     | 10 30 16 E   | N 19° E                             | W 19° N    |
| KAGRA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 日本            | 3                   | 36 24 36 N     | 137 18 36 E  | E 28.3° N                           | N 28.3° W  |
| 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          | 年 月 日        | 年 月 日                               | 年 月 日      |
| O1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2015 9 12     | –2016 1 19          | –              |              | –                                   |            |
| O2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2016 11 30    | –2017 8 25          | 2017 8 1       | –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             |              | –                                   |            |
| <b>O4c</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2025 1 29     | – 2025 <b>11 18</b> | 同左             |              | <b>2025 6 6</b> – <b>2025 11 18</b> |            |

観測された中で特筆すべきイベント **O4a** までの結果をまとめた「突発的重力波カタログ 4 (GWTC4)」として 2025 年 8 月に発表されたものが最新の重力波イベントカタログである。

GW150914 最初に報告された重力波直接観測イベント。BBH の存在を明らかにし、太陽質量 ( $M_{\odot}$ ) の 30 倍以上の BH の存在を初めて確認した。GW170817 最初に報告された BNS イベント。直後に多くの追観測がなされ、マルチ・メッセンジャー天文学の初めての成功例となった。重力波波形から得られた中性子星の状態方程式に対する制限は核密度  $\rho_{\text{nuc}} = 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  の 2 倍の密度における圧力として  $2\rho_{\text{nuc}} = 3.5^{+2.7}_{-1.7} \times 10^{34} \text{ dyn/cm}^2$  (90% 信頼区間) である。 $\gamma$  線が重力波のピークと 1.7 秒差で到着したことから重力波伝播速度の光速からのずれの割合は  $1 \times 10^{-15}$  以下と制限された。また、可視・赤外における追観測から鉄以上の重元素合成の形跡が見られ、 $r$ -過程元素合成の重要なチャンネルになっていることを示唆している。GW190412 明らかに質量比の大きな BBH からの重力波で、重力波の高次モードの検出が試みられた。GW190425 2 番目に発見された BNS。GW190521 **合体後の総質量が  $150 M_{\odot}$  程度と考えられる BBH で、**いわゆる中間質量 BH の領域の候補天体の初の発見となった。GW190814 星形成のシナリオでは不可能とされる  $2\text{--}5 M_{\odot}$  の質量領域（質量ギャップ）のコンパクト天体からの重力波と考えられる。GW200115: 初めて高い精度で NSBH 合体として報告されたイベント。GW230529\_181500 LIGO Livingston でのみ検出されたが、 $1.2\text{--}2.0 M_{\odot}$  と  $2.5\text{--}4.5 M_{\odot}$  の連星合体で、一方は NS の質量領域だが他方は質量ギャップ領域**である。GW230627\_015337 総質量が  $5.78 M_{\odot}$  の最小の BBH。GW231123\_135430 総質量が最大の BBH で、**合体後の質量が  $190\text{--}265 M_{\odot}$  と推定される。一方のブラックホールは**対不安定型超新星による質量ギャップを超える稀な大質量のものであり、**他方の質量は質量ギャップ中に入り、双方ともに高い自転を持つと推定されることから、GW190521 と同様に BBH の第 2 世代の合体が示唆される。

得られた科学的成果 連星系については、その合体頻度について、BBH は赤方偏移  $z = 0$  付近において  $14\text{--}26 \text{ /Gpc}^3/\text{yr}$ 、BNS は  $7.6\text{--}250 \text{ /Gpc}^3/\text{yr}$ 、NSBH は  $9.1\text{--}84 \text{ /Gpc}^3/\text{yr}$  と見積もられている。このほか、背景重力波に対して、宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として（平坦なエネルギースペクトルを仮定した上で） $\Omega_{\text{GW}} < 2.7 \times 10^{-9}$  の上限が得られている。連続重力波の重力波振幅に対しては、おおよそ  $1 \times 10^{-25}$  程度（200 Hz まわり）の上限が得られている。また、既知のパルサーからの連続重力波に対しても個々に上限が得られている。

一般相対性理論の検証も行われ、数あるテストすべてで、一般相対性理論から得られる予言と観測されている重力波信号との間に矛盾は生じていない。今後、発見数が増すにつれて連星系の形成シナリオが明らかになることが期待される。将来的には、銀河系形成シナリオや初期宇宙の情報などにも、重力波観測から多くの知見がもたらされるであろう。

報告されたおもな重力波（2025 年 8 月 現在）  
連星の質量を  $M_1, M_2$  としたときの、チャープ質量  $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$ 、質量比（中央値の比） $M_2/M_1$ 、有効スピン  $\chi_{\text{eff}}$ 、最終的に形成された BH の質量  $M_{\text{final}}$  (NS を含む場合は全質量  $M_{\text{全}} = M_1 + M_2$ )、距離、波源特定精度（平方度） $\Delta\Omega$ 、シグナル・ノイズ比 (SNR) を示す。幅のある量は 90% の信頼区間。（種類ごとに日付順。BBH については、GW190521 と SNR が **17.5** より大きいもののみ。）**イベント名赤字は新規追加、イベント名緑字は削除。**

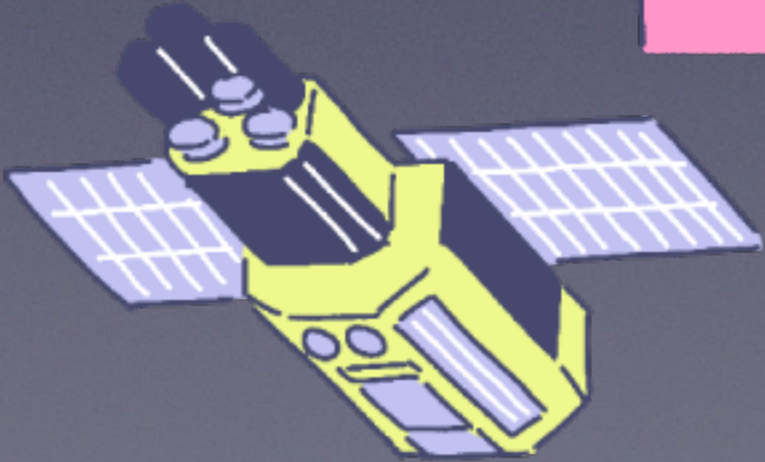
| イベント (BBH)             | $M_c (M_{\odot})$         | 質量比         | $\chi_{\text{eff}}$                       | $M_{\text{final}} (M_{\odot})$           | 距離 (Mpc )                             | $\Delta\Omega$ | SNR         |
|------------------------|---------------------------|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------|
| GW150914               | $28.6^{+1.7}_{-1.5}$      | 0.86        | $-0.01^{+0.12}_{-0.13}$                   | $63.1^{+3.4}_{-3.0}$                     | $440^{+150}_{-170}$                   | 250            | 26          |
| GW170814               | $24.1^{+1.4}_{-1.1}$      | 0.82        | $0.07^{+0.12}_{-0.12}$                    | $53.2^{+3.2}_{-2.4}$                     | $600^{+150}_{-220}$                   | 92             | 17.7        |
| GW190412               | $13.3^{+0.5}_{-0.5}$      | 0.32        | $0.21^{+0.13}_{-0.13}$                    | $35.6^{+4.8}_{-4.5}$                     | $720^{+240}_{-220}$                   | 240            | 19.8        |
| GW190521               | $63.3^{+19.6}_{-14.6}$    | 0.58        | $-0.14^{+0.5}_{-0.45}$                    | $147.4^{+40.0}_{-16.0}$                  | $3310^{+279}_{-180}$                  | 1000           | 14.3        |
| GW190521_074359        | $32.8^{+3.2}_{-2.8}$      | 0.77        | $0.1^{+0.13}_{-0.13}$                     | $72.6^{+6.5}_{-5.4}$                     | $1080^{+580}_{-530}$                  | 470            | 25.9        |
| <b>GW191109_010717</b> | $47.5^{+9.6}_{-7.5}$      | 0.72        | $-0.29^{+0.42}_{-0.31}$                   | $107^{+18.0}_{-15.0}$                    | $1290^{+1130}_{-650}$                 | 1600           | 17.3        |
| <b>GW191204_171526</b> | $8.56^{+0.41}_{-0.28}$    | 0.72        | $0.16^{+0.08}_{-0.05}$                    | $19.18^{+1.71}_{-0.93}$                  | $640^{+200}_{-260}$                   | 350            | 17.4        |
| GW191216_213338        | $8.33^{+0.19}_{-0.19}$    | 0.64        | $0.11^{+0.13}_{-0.06}$                    | $18.87^{+0.93}_{-0.93}$                  | $340^{+130}_{-130}$                   | 490            | 18.6        |
| GW200112_155838        | $27.4^{+2.6}_{-2.1}$      | 0.79        | $0.06^{+0.15}_{-0.15}$                    | $60.8^{+5.3}_{-4.3}$                     | $1250^{+430}_{-460}$                  | 4300           | 19.8        |
| GW200129_065458        | $27.2^{+2.1}_{-2.3}$      | 0.84        | $0.11^{+0.11}_{-0.16}$                    | $60.2^{+4.1}_{-3.2}$                     | $890^{+260}_{-370}$                   | 130            | 26.8        |
| GW200224_222234        | $31.1^{+3.3}_{-2.0}$      | 0.82        | $0.1^{+0.15}_{-0.16}$                     | $68.7^{+6.7}_{-4.8}$                     | $1710^{+500}_{-650}$                  | 50.0           | 20          |
| GW200311_115853        | $26.6^{+2.4}_{-2.0}$      | 0.81        | $-0.02^{+0.16}_{-0.2}$                    | $59^{+4.8}_{-3.9}$                       | $1170^{+280}_{-400}$                  | 35             | 17.8        |
| <b>GW230627_015337</b> | $6.02^{+0.16}_{-0.07}$    | 0.70        | $0.02^{+0.08}_{-0.03}$                    | $13.5^{+0.8}_{-0.5}$                     | $310^{+60}_{-130}$                    | 99             | 28.7        |
| <b>GW230814_230901</b> | $26.8^{+0.8}_{-0.9}$      | 0.85        | $-0.01^{+0.05}_{-0.08}$                   | $58.9^{+1.8}_{-1.8}$                     | $200^{+100}_{-100}$                   | 25000          | 45.9        |
| <b>GW230914_111401</b> | $39.8^{+7.5}_{-6.3}$      | 0.60        | $0.1^{+0.2}_{-0.2}$                       | $91.5^{+13.9}_{-9.7}$                    | $2600^{+1600}_{-1200}$                | 1600           | 17.7        |
| <b>GW230927_153832</b> | $16.4^{+0.8}_{-0.8}$      | 0.75        | $0.02^{+0.07}_{-0.08}$                    | $36.6^{+3.1}_{-2.1}$                     | $1200^{+400}_{-500}$                  | 270            | 21.5        |
| <b>GW231028_153006</b> | $62.0^{+13.0}_{-10.0}$    | 0.54        | $0.4^{+0.2}_{-0.2}$                       | $145^{+27}_{-14}$                        | $4100^{+1400}_{-1800}$                | 1200           | 22.9        |
| <b>GW231123_135430</b> | $102^{+12}_{-31}$         | 0.75        | $0.3^{+0.2}_{-0.4}$                       | $225^{+26}_{-43}$                        | $2200^{+1900}_{-1500}$                | 1200           | 22.6        |
| <b>GW231206_233901</b> | $28.1^{+2.6}_{-1.7}$      | 0.76        | $-0.05^{+0.13}_{-0.14}$                   | $63.0^{+4.7}_{-3.3}$                     | $1500^{+300}_{-500}$                  | 310            | 22.9        |
| <b>GW231226_101520</b> | $32.5^{+1.5}_{-1.3}$      | 0.88        | $-0.09^{+0.08}_{-0.09}$                   | $71.5^{+3.1}_{-2.5}$                     | $1200^{+200}_{-300}$                  | 150            | 40.7        |
| イベント (BNS)             | $M_c (M_{\odot})$         | 質量比         | $\chi_{\text{eff}}$                       | $M_{\text{全}} (M_{\odot})$               | 距離 (Mpc)                              | $\Delta\Omega$ | SNR         |
| GW170817               | $1.186^{+0.001}_{-0.001}$ | 0.87        | $0^{+0.02}_{-0.01}$                       | –                                        | $40^{+7.0}_{-15.0}$                   | 16             | 33          |
| GW190425               | $1.44^{+0.02}_{-0.02}$    | 0.62        | $0.07^{+0.07}_{-0.05}$                    | $3.4^{+0.3}_{-0.1}$                      | $150^{+80}_{-60}$                     | 8700           | 12.4        |
| イベント (NSBH)            | $M_c (M_{\odot})$         | 質量比         | $\chi_{\text{eff}}$                       | $M_{\text{全}} (M_{\odot})$               | 距離 (Mpc)                              | $\Delta\Omega$ | SNR         |
| GW190917_1114630       | $3.7^{+0.2}_{-0.2}$       | 0.22        | $-0.08^{+0.21}_{-0.43}$                   | $11.8^{+3.0}_{-2.8}$                     | $720^{+300}_{-310}$                   | 2100           | 8.3         |
| GW200115_042309        | $2.43^{+0.05}_{-0.07}$    | 0.24        | $-0.15^{+0.23}_{-0.42}$                   | $7.4^{+1.7}_{-1.7}$                      | $290^{+150}_{-100}$                   | 370            | 11.3        |
| <b>GW230518_125908</b> | $2.80^{+0.06}_{-0.06}$    | 0.17        | $-0.01^{+0.09}_{-0.11}$                   | $9.4^{+0.7}_{-0.8}$                      | $240^{+110}_{-100}$                   | 520            | 14.3        |
| イベント (低質量ギャップ天体を含む)    | $M_c (M_{\odot})$         | 質量比         | $\chi_{\text{eff}}$                       | $M_{\text{全}} (M_{\odot})$               | 距離 (Mpc )                             | $\Delta\Omega$ | SNR         |
| <b>GW190814</b>        | $6.11^{+0.06}_{-0.05}$    | 0.11        | $0^{+0.07}_{-0.07}$                       | $25.7^{+1.3}_{-1.3}$                     | $230^{+40}_{-50}$                     | 22             | 25.3        |
| <b>GW230529_181500</b> | $1.94^{+0.04}_{-0.04}$    | <b>0.36</b> | <b><math>-0.05^{+0.14}_{-0.15}</math></b> | <b><math>5.04^{+0.82}_{-0.62}</math></b> | <b><math>200^{+110}_{-100}</math></b> | 24000          | <b>11.8</b> |





# 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]   | $10^{-13}$                                                                         | $10^{-10}$         | $10^{-9}$          | $3.8 \times 10^{-7}$                                                                | $7.7 \times 10^{-7}$ | $10^{-4}$ | 1                  | 10              | $10^2$          | $10^3$          | $10^4$          |                 |  |
| 波長[nm]  |                                                                                    |                    |                    | 380                                                                                 | 770                  |           |                    |                 |                 |                 |                 |                 |  |
| 振動数[Hz] |                                                                                    | $3 \times 10^{18}$ | $3 \times 10^{17}$ |  |                      |           | $3 \times 10^{12}$ | $3 \times 10^8$ | $3 \times 10^7$ | $3 \times 10^6$ | $3 \times 10^5$ | $3 \times 10^4$ |  |
| 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<br>電子レンジ      | テレビ<br>FMラジオ    | 短波ラジオ           | AMラジオ           | 電波時計<br>飛行機の通信  |                 |  |



重力波





# 相対性理論の検証の歴史と重力波天文学 まとめ

アインシュタインが1915年に構築した一般相対性理論は、ブラックホールの存在を予言し、宇宙膨張を予言し、重力波の存在を予言した。

100年が経過し、技術が向上して、人類はようやくこれらの確認ができるようになった。

一般相対性理論は、これまでのあらゆる検証試験にパスしている。

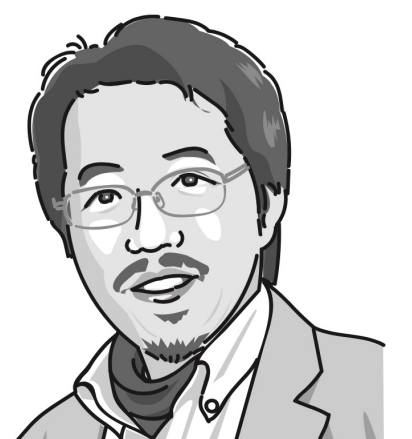
しかし、量子論を含めた究極理論の構築には、一般相対性理論の綻びをみつけ、次のステップへ進むことが必要である。

重力波の観測が開始されて10年たち、300例を超える観測がなされている。

ブラックホールという強い重力のはたらく極限時空での理論検証が可能になってきた。

観測されている波形はいずれも一般相対性理論と無矛盾である。

一般相対性理論が正しくて、嬉しいような悔しいような....





The Gravity Realm: Unveiling the Secrets of Black Holes and Gravitational Waves

「ブラックホールと重力波」台湾・日本全国巡回展

# 極限時空

2025年12月20日(土)～2026年1月25日(日)

休館日: 2025年12月29日(月)～2026年1月1日(木)・7日(日)～9日(火)

主催: 「ブラックホールと重力波展」実行委員会  
協力: 国立自然科学博物館、国立清華大學、中央研究院天文及天文物理研究所、廖本祥工作室、国立天文台、東京大学宇宙線研究所、大阪工業大学

工作もあるよ!

**当日 チケット制** 12/21・26～28・1/2～6 10:15～11:30～13:30～14:45 (各回約45分)

**工作 星降るスノードーム**

光る砂が星のように舞降るスノードームを作ります。

**対象** どなたでも (未就学児は保護者が作製)

**定員** 12名 **会場** 1F 工房

**参加費** 1,200円

\*保護者1名につき未就学児2名まで購入可  
\*参加者1名につき保護者1名まで見学可

**当日 チケット制** 1/2～6 10:30～13:30 (各回約60分)

**工作 ブラックホールトルネードを作ろう**

ペットボトルを組み合わせてブラックホールのようにどんどん吸い込んだらトルネードを作ります。

**対象** どなたでも (未就学児は保護者が作製)

**定員** 8名 **会場** 2F 実験室

**参加費** 900円

\*保護者1名につき未就学児2名まで購入可  
\*参加者1名につき保護者1名まで見学可

**当日 チケット制** 1/2～6 10:15～11:30～13:30～14:45 (各回約45分)

**工作 雪の結晶万華鏡**

ガラスカレットを使って、雪の結晶のように見える万華鏡を作ります。

**対象** どなたでも (未就学児は保護者が作製)

**定員** 15名 **会場** 1F 会議室

**参加費** 800円

\*保護者1名につき未就学児2名まで購入可  
\*参加者1名につき保護者1名まで見学可

**当日 自由参加** 12/26～28・1/2～6 10:00～16:30 (時間内随時受付)

**工作 ブラックホール・スライム**

「あるもの」を吸い込んだらブラックホールのような真っ黒スライムを作ります。

**対象** どなたでも (未就学児は保護者が作製)

**定員** なし **会場** 2F 実験室

**参加費** 500円

主 催: はまぎん こども宇宙科学館  
後 援: 横浜市教育局、横浜市小学校理科研究会、横浜質市教育委員会、横浜質市小学校理科研究会、鎌倉市教育局、逗子市教育局、葉山町教育委員会、三浦市教育局  
協 力: 国立天文台、はまぎん こども宇宙科学館ボランティア会

——極限時空「ブラックホールと重力波」展

会場 5Fフロア (一部 B2 特別展示室ほか)  
時間 9:30～17:00

×ブラックホールと重力波の研究パネル ×ブラックホールと重力波なぞ解きツアー  
×ブラックホールとつじよに写真をとろう ×地球の重力を抜け出せるか!? 重力脱出体験  
×はまぎんキッズ・サイエンスシアター「ブラックホール観測リレー」×ブラックホールを撮影してみよう  
×ブラックホール顔はめパネル ×スペースガード・アス ×缶バッジをつくろう

**当日 チケット制** 12/20～21・26～28 10:15～13:30 (各回約90分)

**工作 星座走馬灯を作ろう**

電球の熱の力でくるくる回る12星座の走馬灯を作ります。

**対象** 小学生～大人 (小学生以下は保護者同伴)

**定員** 8名 **会場** 2F 多目的室

**参加費** 2,500円

\*参加者1名につき保護者1名まで見学可

**当日 チケット制** 12/26～28 10:15～11:30～13:30～14:45 (各回約45分)

**工作 冬のハーバリウム**

好きな植物やオブジェを入れてお家で飾れるハーバリウムを作ります。

**対象** どなたでも (未就学児は保護者が作製)

**定員** 8名 **会場** 2F 実験室

**参加費** 1,200円

\*保護者1名につき未就学児2名まで購入可  
\*参加者1名につき保護者1名まで見学可

**当日 自由参加** 12/26～28・1/2～6 10:00～16:30 (時間内随時受付)

**工作 星空まんげきよう**

星空のようにきらきら輝く箱型のまんげきようを作ります。

**対象** どなたでも

**会場** B2 特別展示室

**定員** 200名 **参加費** 700円

**当日 自由参加** 12/25～27 11:00～12:30・13:30～15:00 (時間内随時受付)

**工作 プログラミングランド 2025**

ボランティアスタッフが作ったガジェットおもちゃが大集合! お気軽にプログラミングの世界をお楽しみいただけます。

**対象** どなたでも

**会場** 1F 会議室

**定員** なし? **参加費** 無料

**当日 チケット制** 12/26～28 10:00～11:45～14:15 (各回約60分)

**親子教室 プログラミング体験! WeDo2.0**

ブロックとタブレットを使ったプログラミングを体験します。ロボットを組み立てたら、プログラミングして動かしてゲームに挑戦しよう!

**対象** 年長～小学3年生とその保護者

**定員** 8組16名 **会場** 1F 教室

**参加費** 1,000円

\*保護者1名につき未就学児2名まで購入可

**当日 チケット制** 1/2～6 10:00～11:45～14:15 (各回約60分)

**親子教室 プログラミング体験! WeDo2.0**

ブロックとタブレットを使ったプログラミングを体験します。ロボットを組み立てたら、プログラミングして動かしてゲームに挑戦しよう!

**対象** 年長～小学3年生とその保護者

**定員** 8組16名 **会場** 1F 教室

**参加費** 1,000円

\*保護者1名につき未就学児2名まで購入可

2026年1月24日(土) 事前申込制 イグノーベル賞受賞記念 特別講演  
「ウシをシマウマ柄にすると虫が寄り付かない!?!」

〒235-0045 横浜市磯子区洋光台5-2-1  
☎045-832-1166 (受付/9:30～17:00)  
★団体専用窓口 ☎045-832-1177 (受付/9:30～17:00)  
https://www.yokohama-kagakukan.jp

<開館時間> 9:30～17:00 (最終入館は16:00まで)  
<交通> JR京浜東北線・根岸線洋光台駅下車徒歩3分  
<駐車場> 乗用車 (1回700円 約70台)  
※駐車可能台数は利用日により異なります

<入館料> 大人(高校生以上) 400円、小人(小・中学生) 200円 ※土曜日は高校生以下入館料無料  
<プラネタリウム入場料> 大人(高校生以上) 600円、小人(4才～中学生) 300円  
※3才以下のお子様でも座席をご利用の場合は有料となります  
<定期入館料(1人6か月につき)> 大人(高校生以上) 800円、小人(小・中学生) 400円

はまぎんこども宇宙科学館, 2025年12月20日ー2026年1月25日  
ブラックホールと重力波 極限時空展