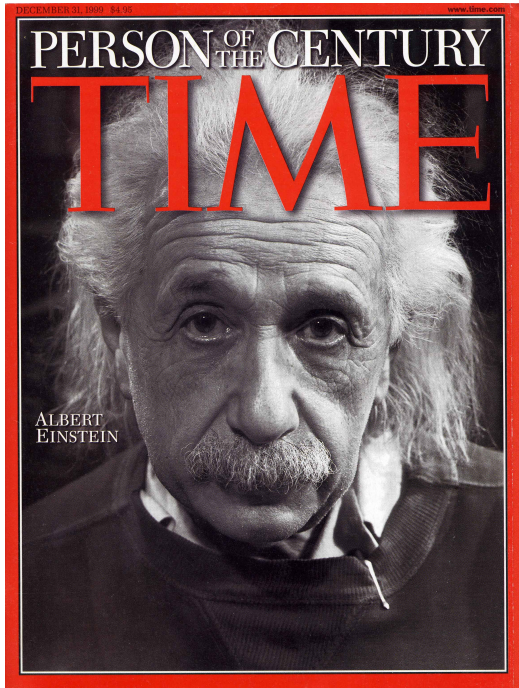


100歳を超えた相対性理論



Time
1999/12/31

1. 2つの相対性理論
2. ブラックホールの観測
3. 重力波の検出
4. 時計を使った相対性理論の検証

真貝寿明（しんかい ひさあき）
大阪工業大学 情報科学部 教授
理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



大阪市中央公民館 設計者・片岡安



大阪工業大学（大宮キャンパス）工学部・知的財産学部
正門 片岡安メモリアルゲート



大阪工業大学初代校長

大阪にも国会議事堂がある？（謎解きクルーズ）

街のシンボル、いちびり精神 遊び感覚を建築に

2015年2月7日 6:30



大阪で生まれ育った記者は真面目に「日本の中心は大阪やで」と思っている。東京への対抗意識というより、もっと根が深い大阪人のアイデンティティーの問題かもしれない。そんなことを考えていたら、国権の最高機関である国会議事堂が大阪にもある、という噂を耳にした。気になって現地に足を運んだ。



国会議事堂を模した大阪工大のキャンパス（大阪府枚方市）

大阪府枚方市にある大阪工業大学枚方キャンパス。情報科学部の建物は一見すると国会議事堂と区別が付かない。6階建て、高さ約60メートル、幅約180メートル。本物の国会議事堂が高さ約65メートル、幅約210メートルだから、ほぼ近い大きさだ。

遠くからでも目立つが、近づくとすごい迫力。内装は普通の学校と変わらない。教室や教授室などがある。こんな立派な建物なら有意義な大学生活を送れそうだ。

大阪工業大学（枚方キャンパス） 情報科学部



朝日新聞航空部twitterより

東京の国会議事堂



国会議事堂ウェブページより

アインシュタイン 1922年来日 (11/17—12/29)

12月17日 奈良ホテルでピアノを弾く

旅の疲れはバイオリンとピアノで癒す。無類の音楽愛好家アインシュタイン。



ピアノを弾くアインシュタイン——奈良ホテルのメインダイニングで。

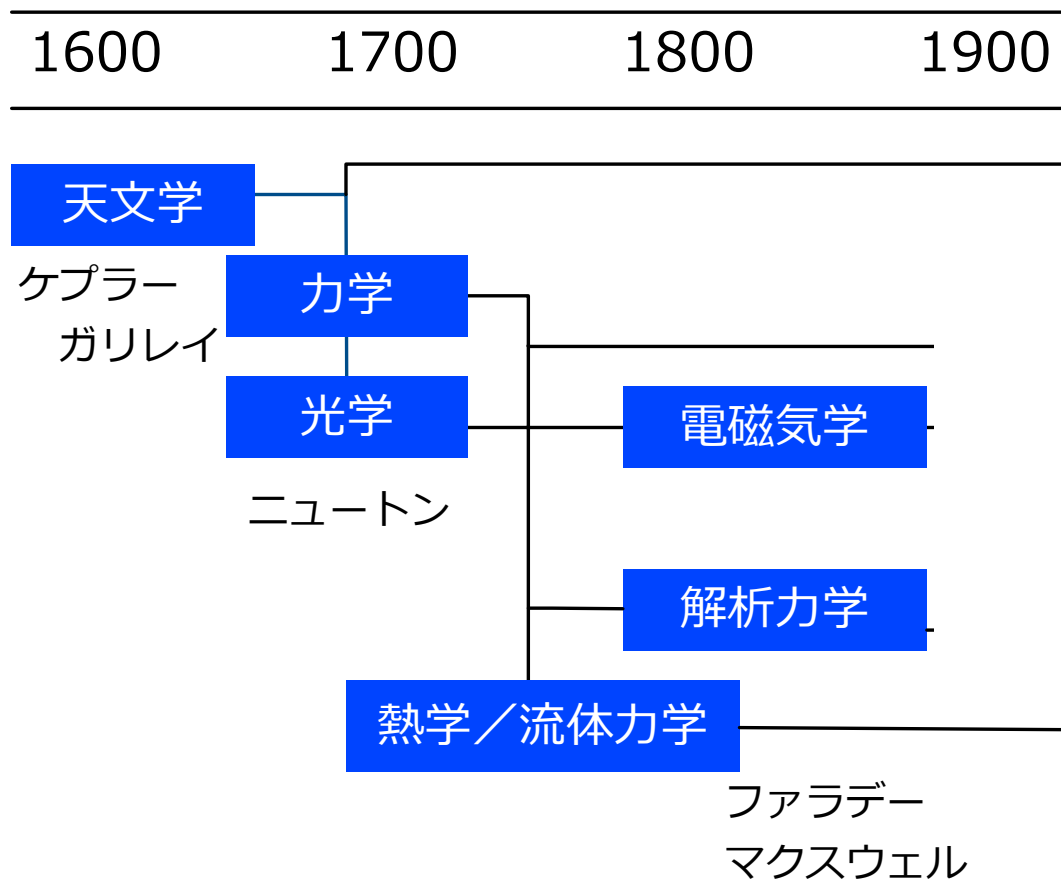


奈良ホテルにピアノが2009年に戻る
(戦後60年間行方不明だった)



1. 相対性理論

近代物理学の進展

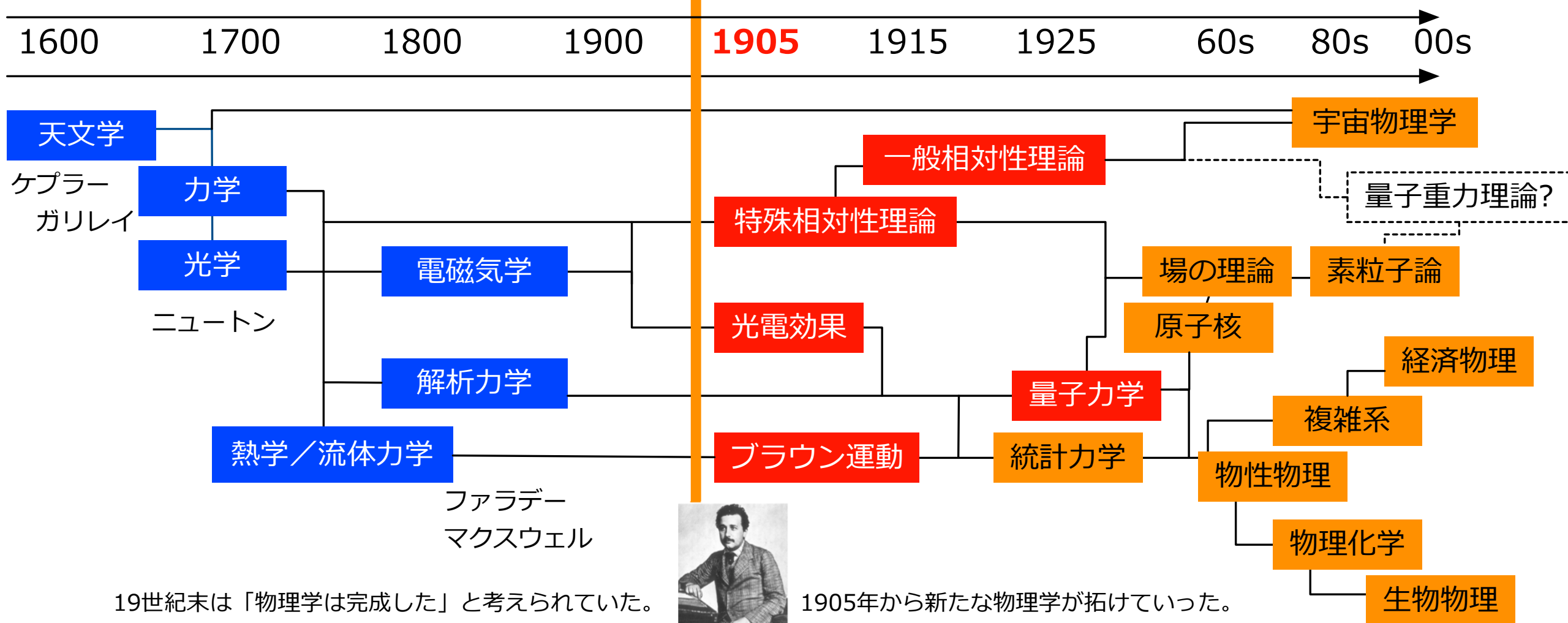


19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

1. 相対性理論

近代物理学の進展

現代物理学の進展



これまでの物理学を否定せず、拡張した理論！

特殊相対性理論

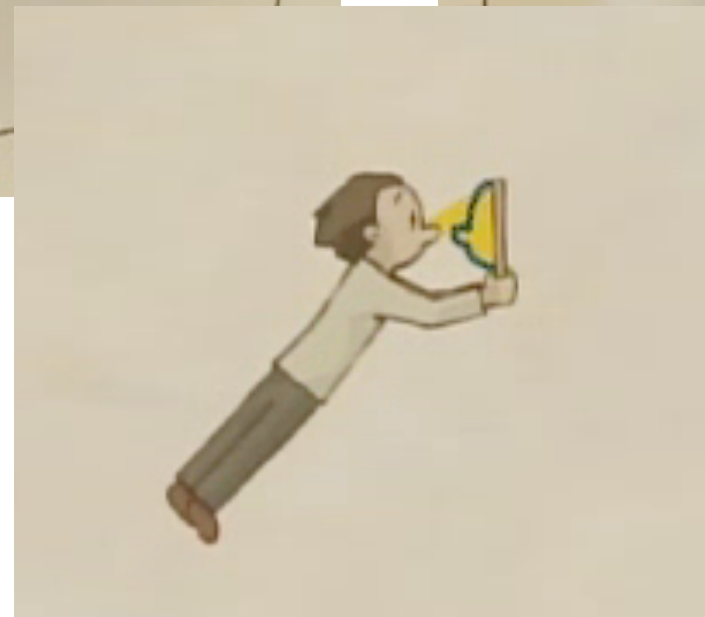
光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

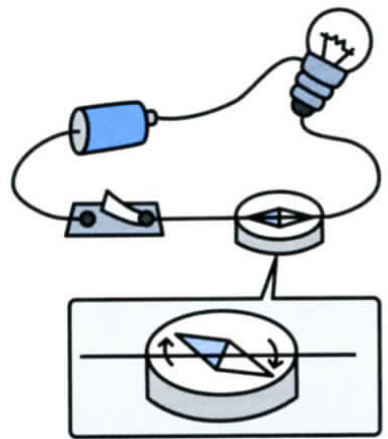
光の速さで動く人が鏡をみると 自分の顔が映るのが見えるのだろうか？



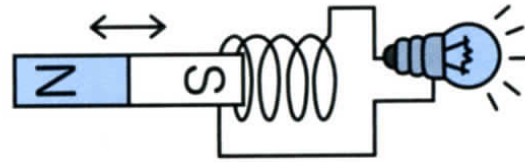
NHK 100分で名著のwebページより.

http://www.nhk.or.jp/meicho/famousbook/17_einstein/index.html#box01

電磁気学の完成から生じた疑問



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

電磁誘導現象の発見 (1831年)



ファラデー

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ (1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



マクスウェル

Eは電場, Bは磁場
cは光速??

誰が測った光速???

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0.\end{aligned}$$

光の速さは誰が測っても同じ, と考えてみよう

時間の進み方は, 相対的だ. 測定する人の運動状態によって異なる.

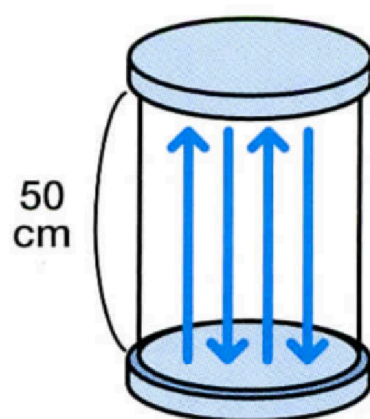


アインシュタイン

時間の進み方は観測者によって異なる

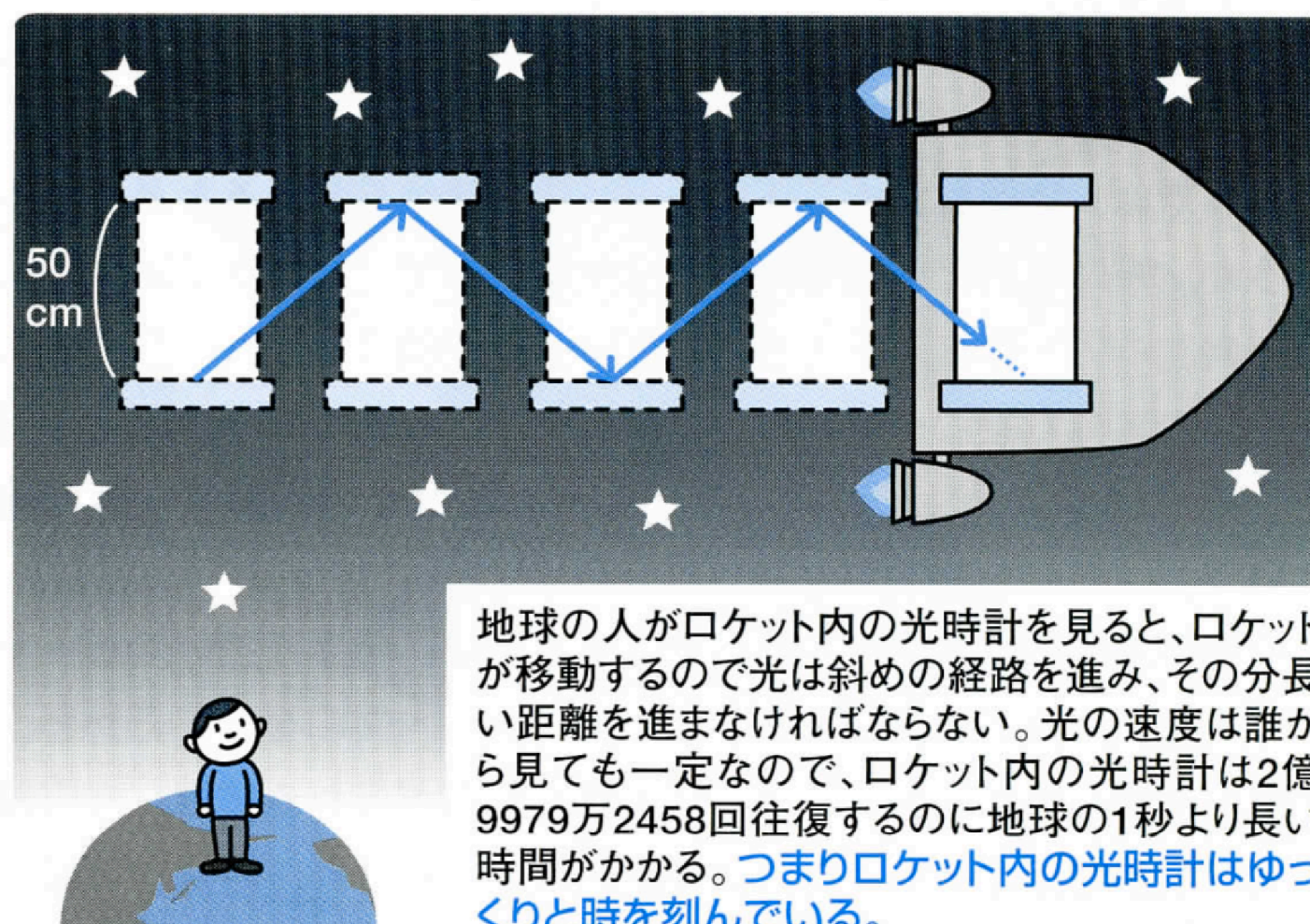
時間の進み方は、観測する人によって異なる。

時間の進み方は**相対的**になる。



光時計

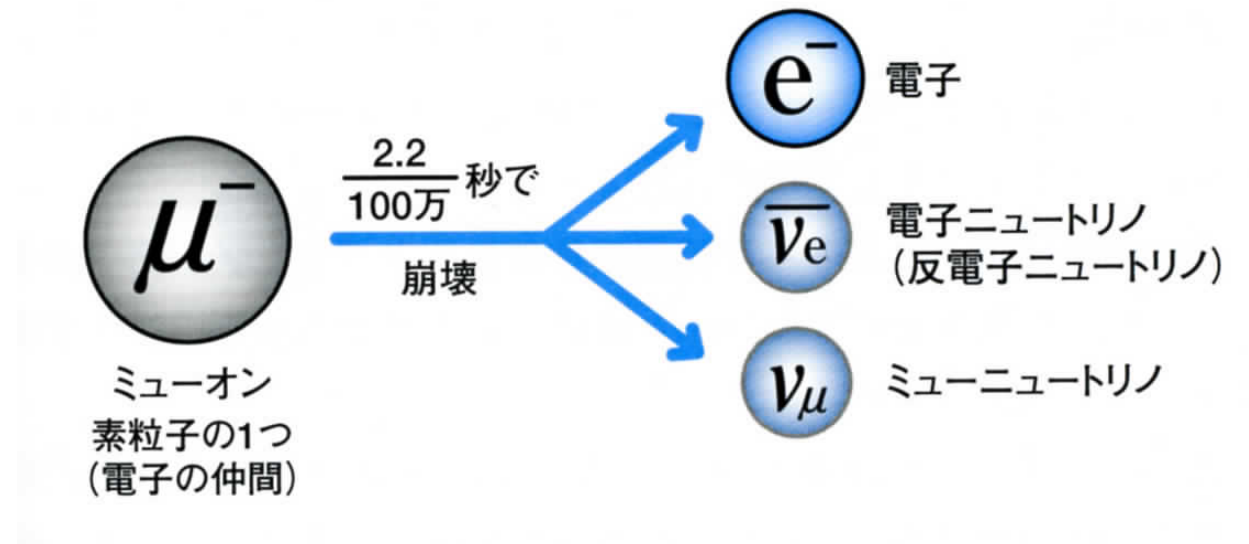
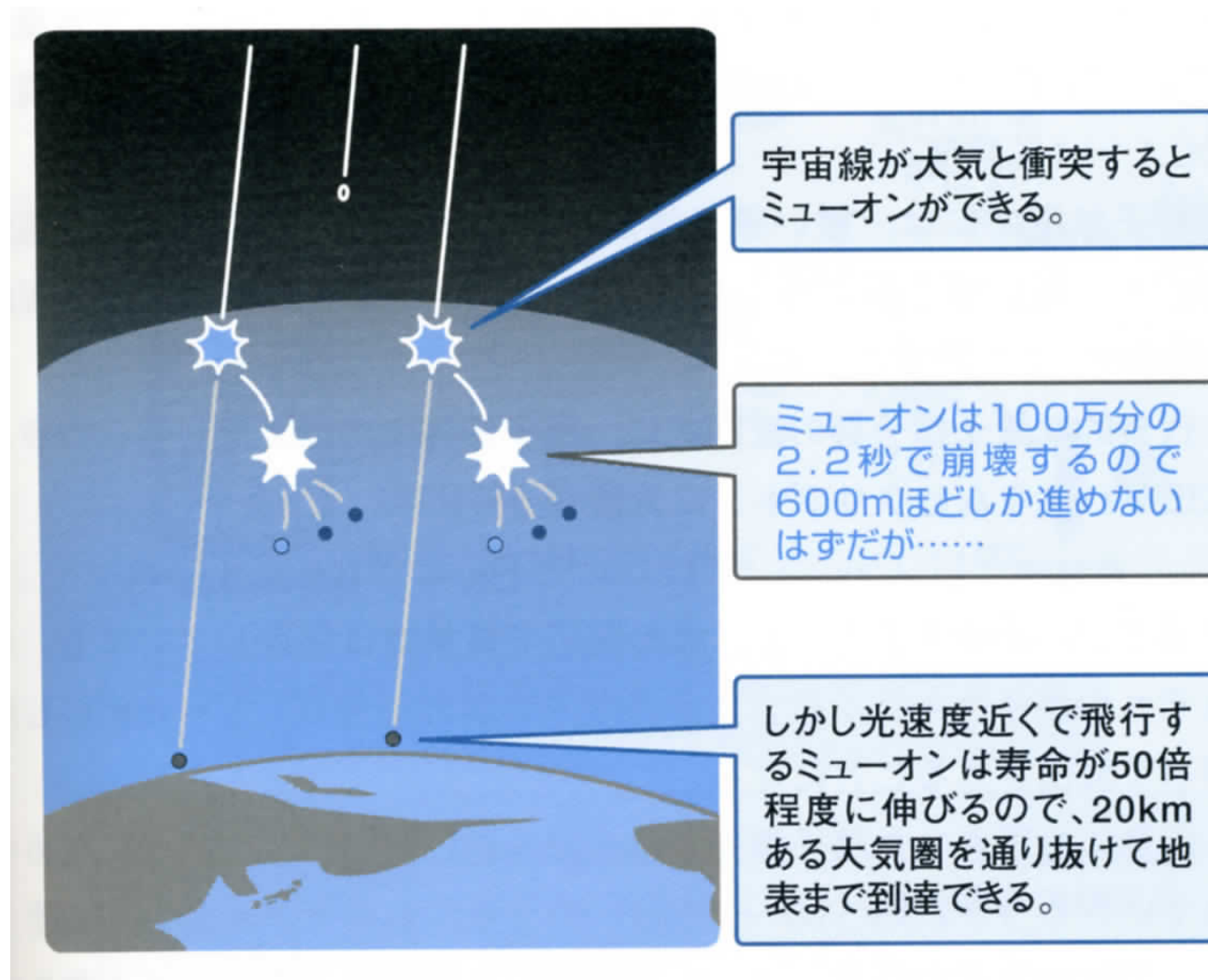
光が2億9979万2458回往復すると「1秒」を刻む時計



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

素粒子の寿命は確かに延びている！



ISSは秒速 7.8km

1年間乗務すると、...

0.01067秒 地表より時間が短くなる

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」

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

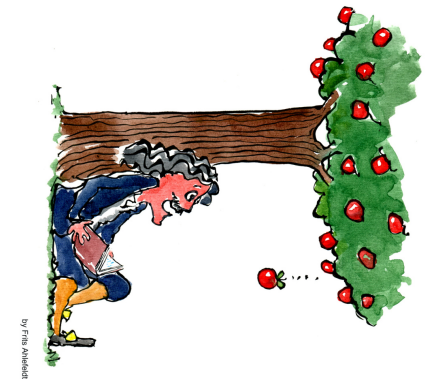
$$F = ma$$

1. 相対性理論

ニュートン : リンゴはなぜ落ちる？



<http://hikingartist.com/>



1. 相対性理論

ニュートン : 万有引力の法則



<http://hikingartist.com/>

万有引力の法則

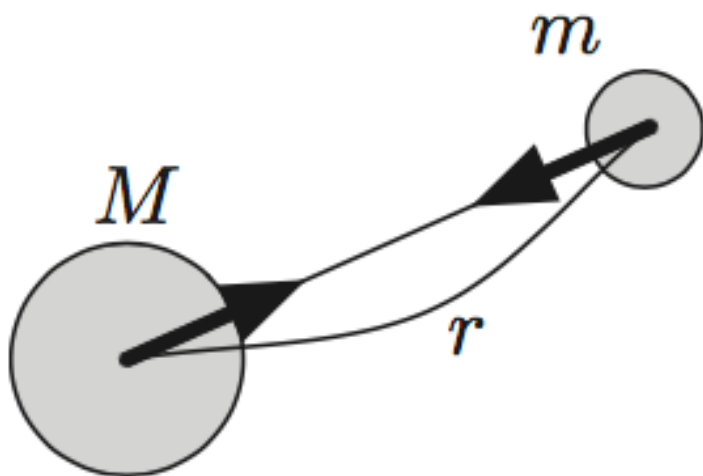
すべてのものは、引力で引き合う

◆ Advanced 万有引力の法則

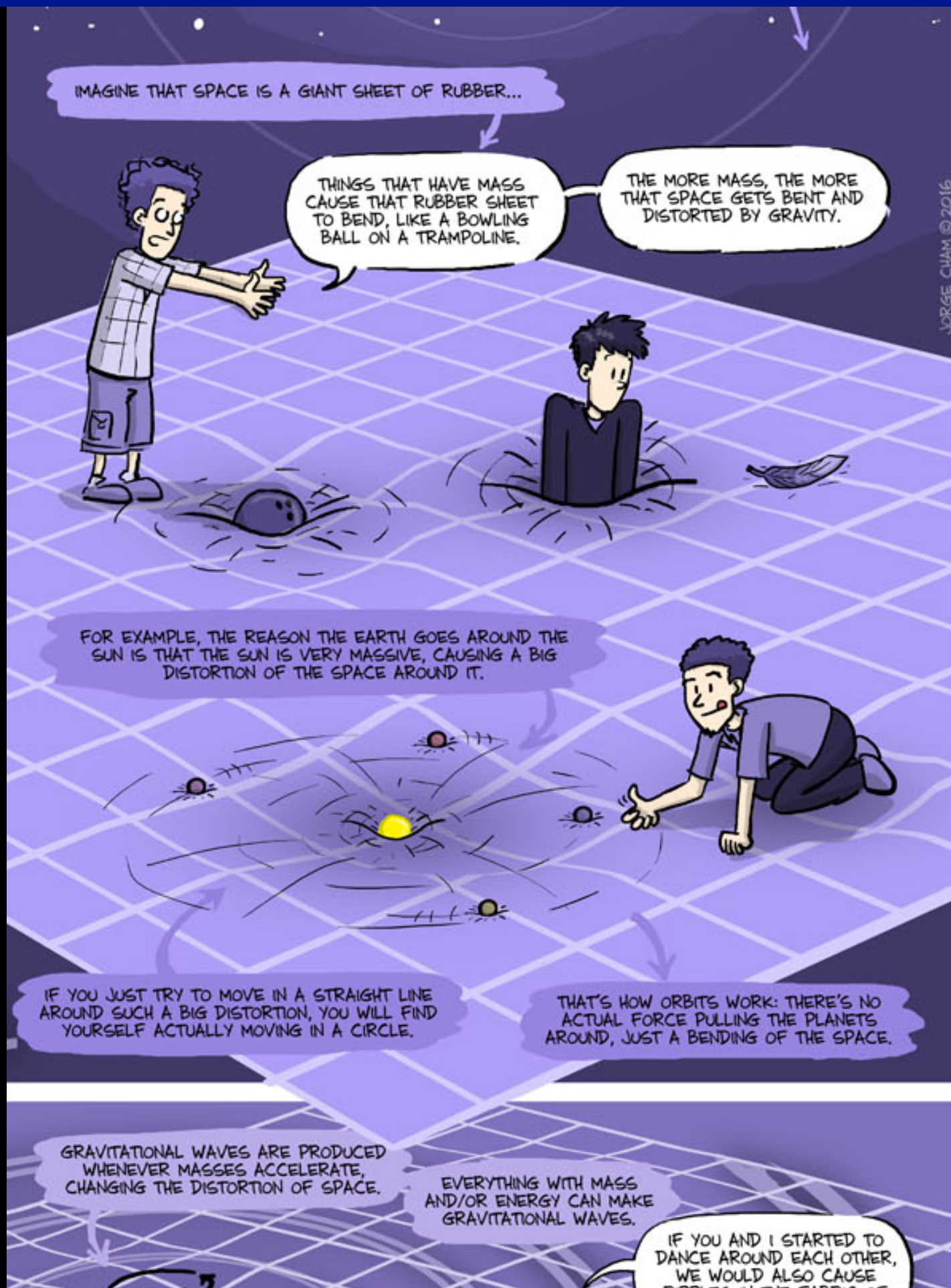
質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

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

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。



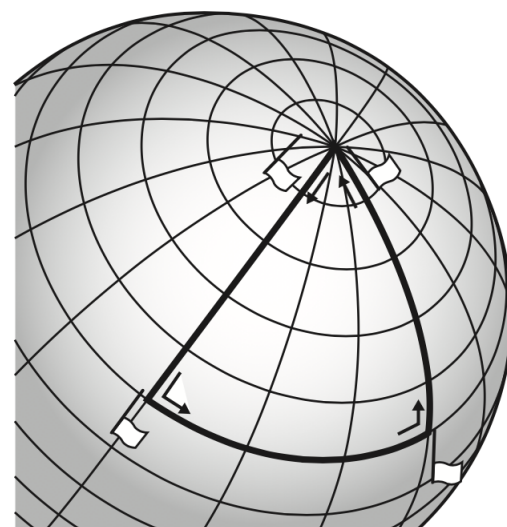
一般相対性理論



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

一般相対性理論 (1915年)



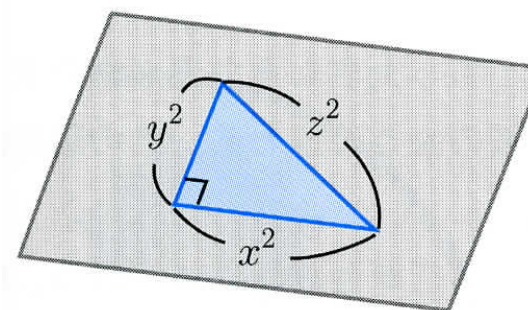
正の曲率 (地球表面)

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

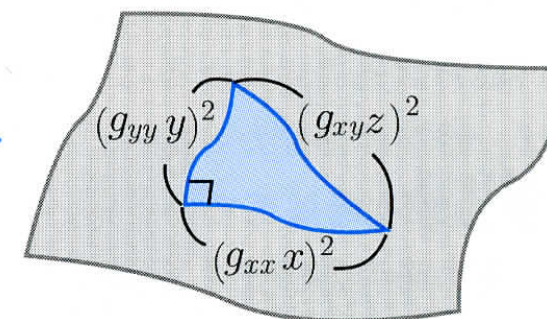
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

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)

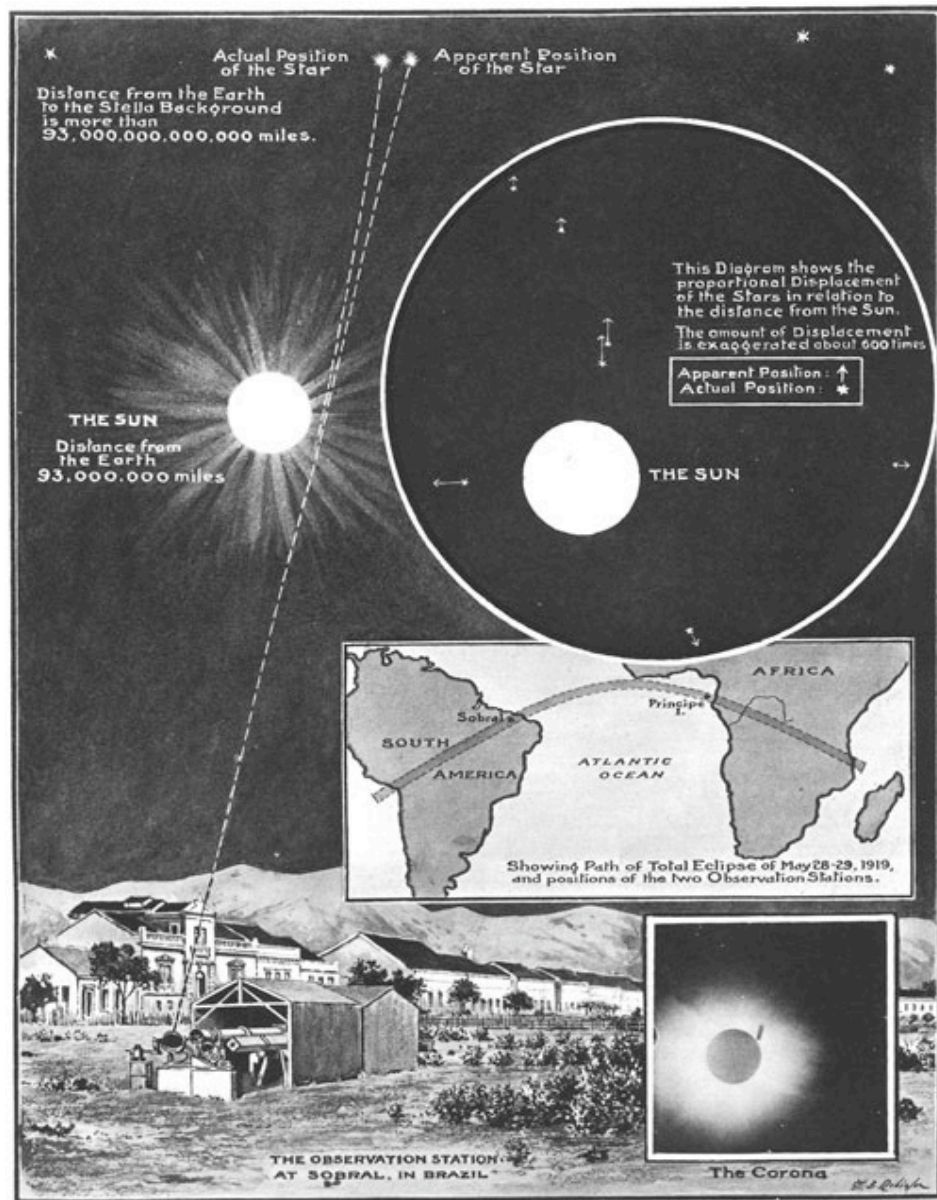
重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

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

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。

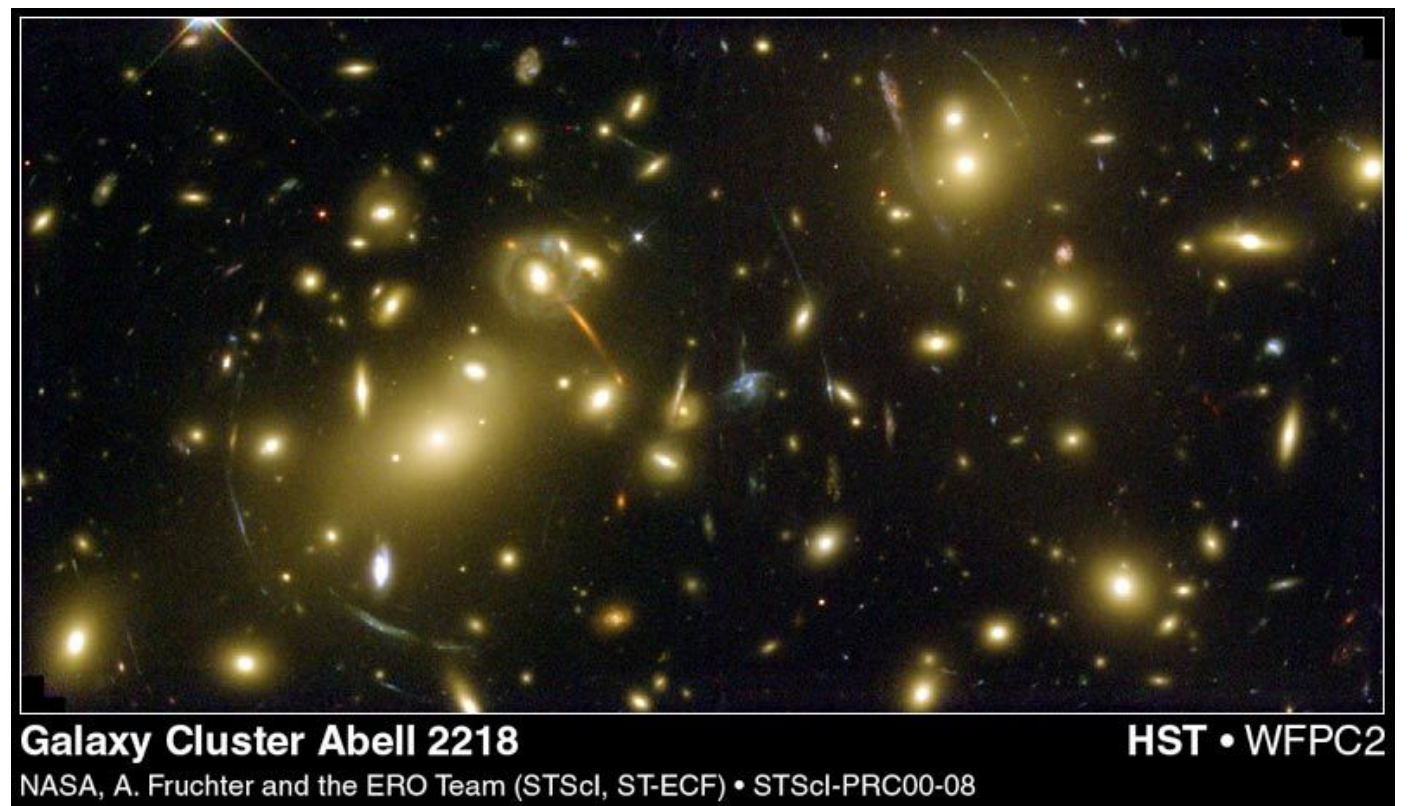
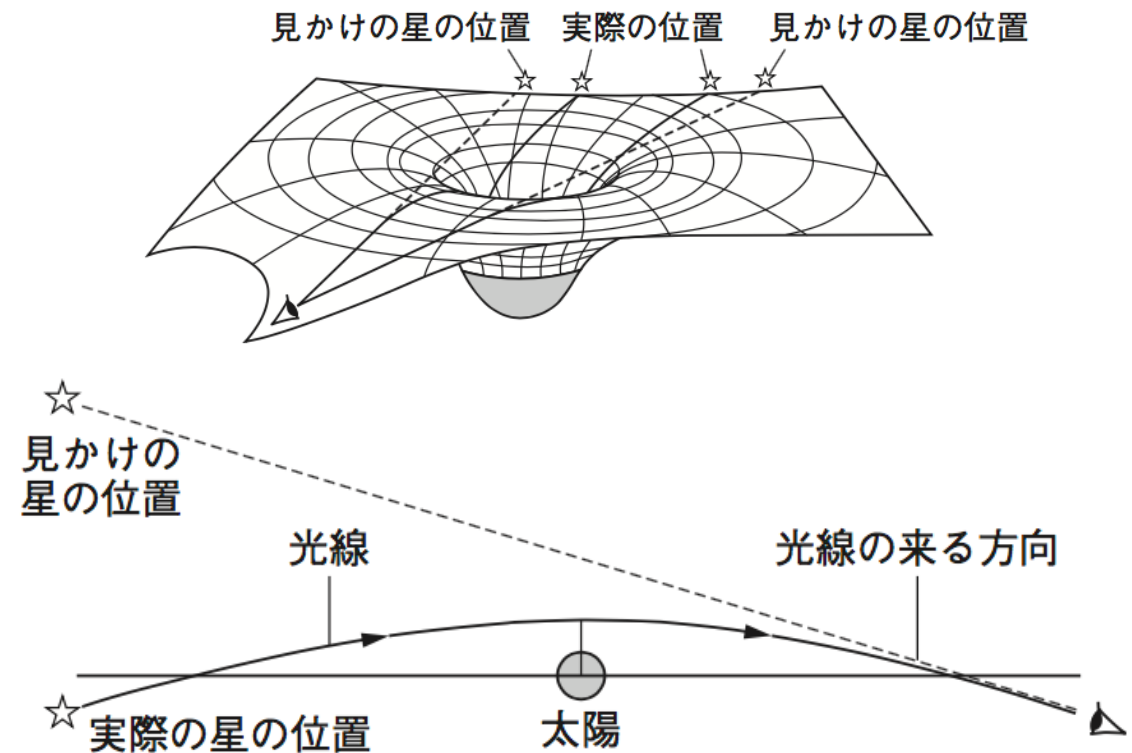
一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

- 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる

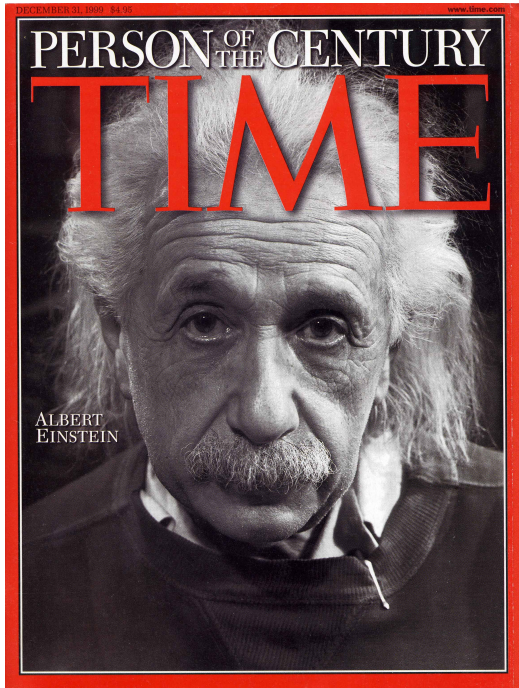


1919年5月の皆既日食で
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が
普段の位置とずれていた

重力レンズ効果として観測される▶



100歳を超えた相対性理論



Time
1999/12/31

1. 2つの相対性理論
2. **ブラックホールの観測**
3. 重力波の検出
4. 時計を使った相対性理論の検証

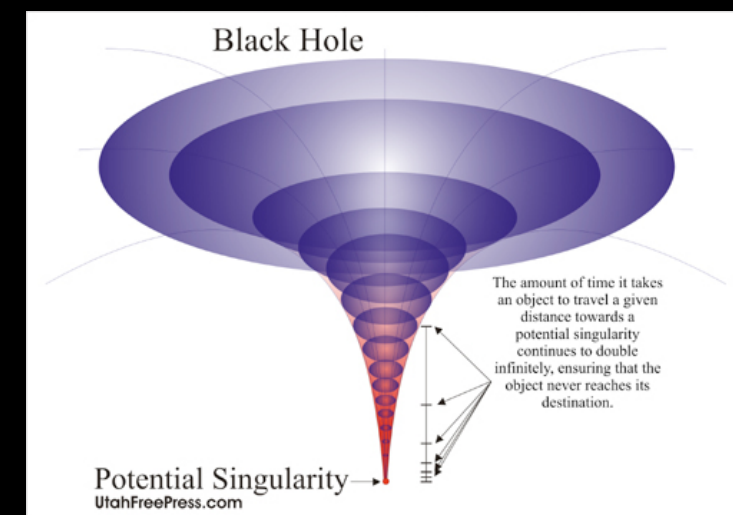
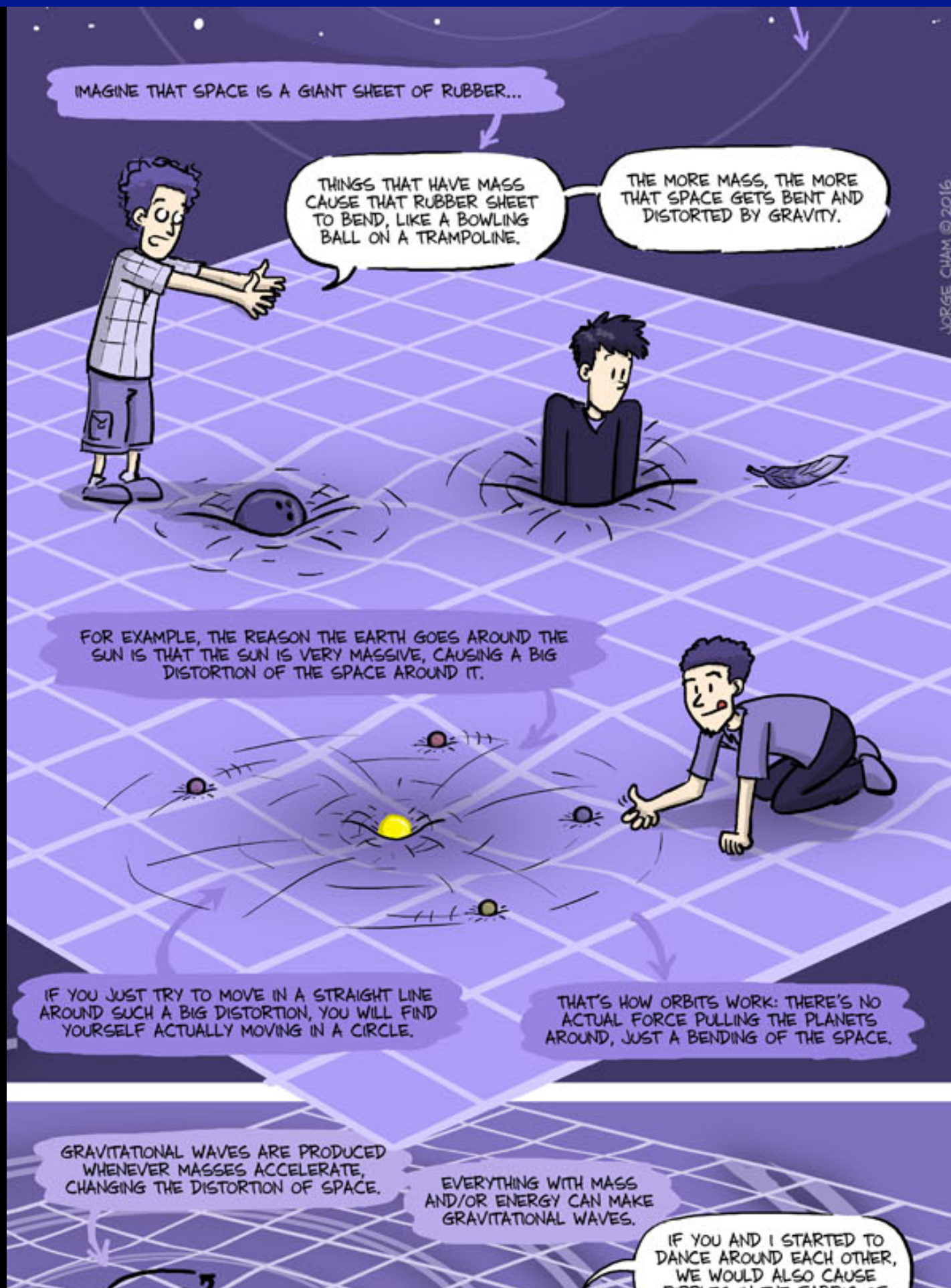
真貝寿明（しんかい ひさあき）
大阪工業大学 情報科学部 教授
理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



2021/12/11 「99年目のアインシュタイン」 @大阪市立科学館x大阪市中央公会堂

ブラックホール



とてつもなく 重くて小さな天体では

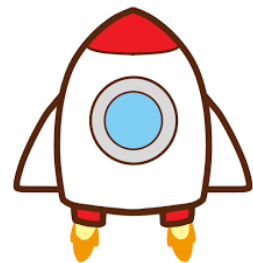
ボールを速く投げ上げると、
高くまで飛ぶ

秒速
30万 km

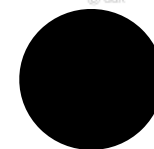
光も
脱出できない



地球からの脱出速度
秒速 12 km



光は当然
脱出できる



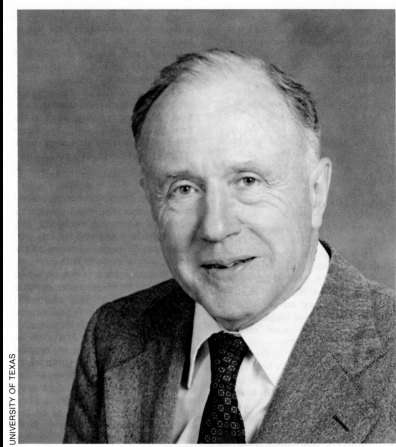
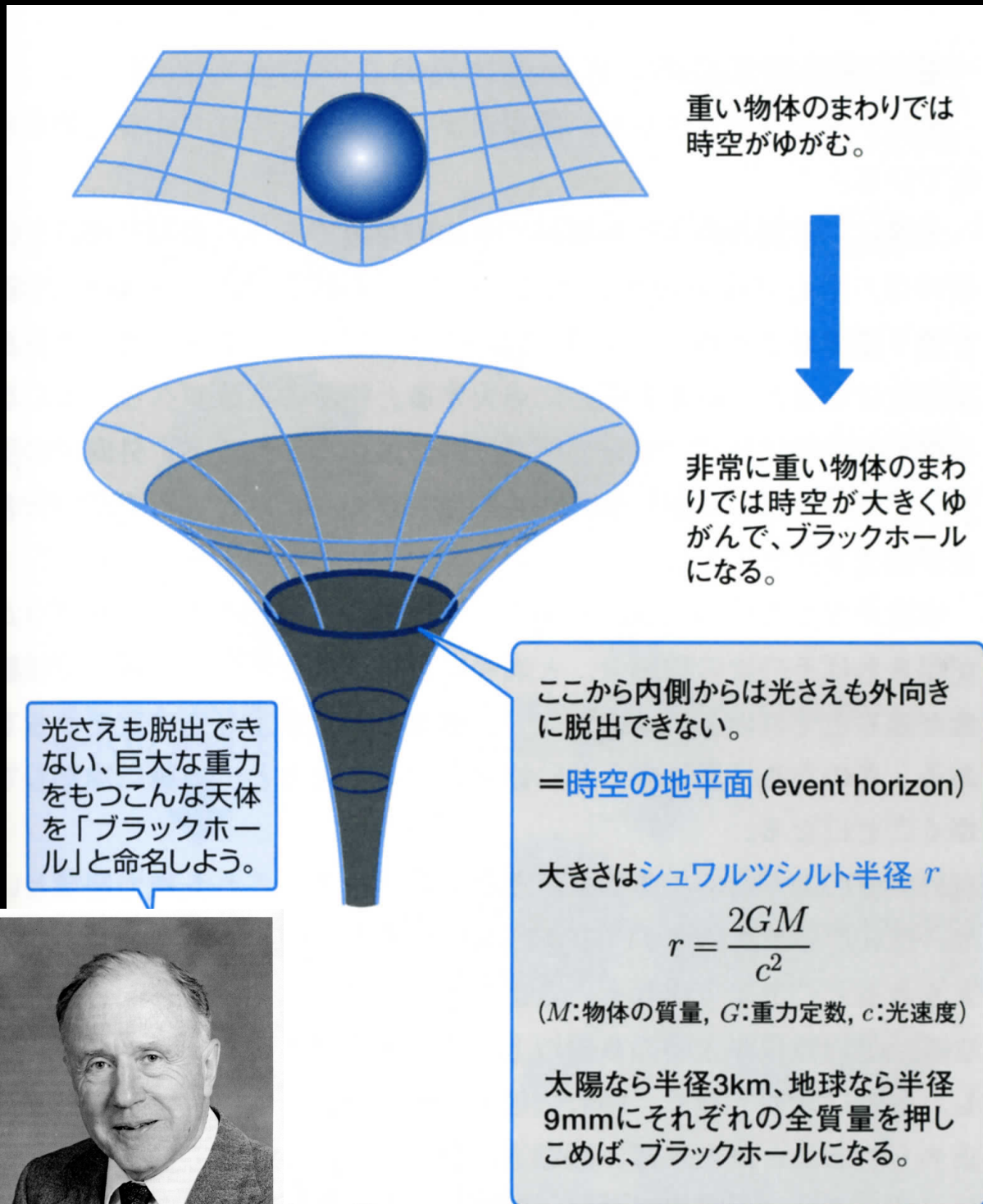
**地球質量が半径9mmに
なったら、
ブラックホール**

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)

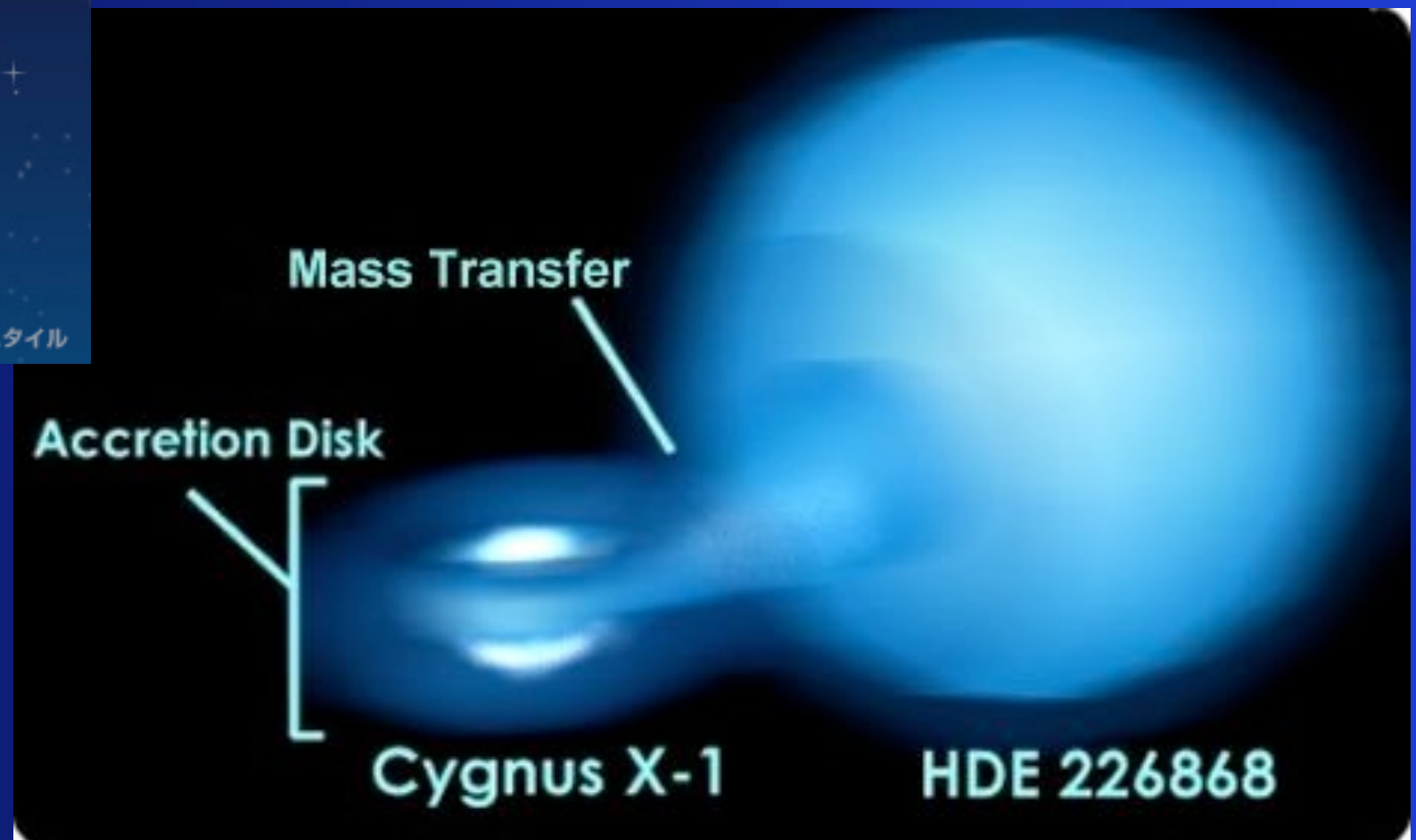
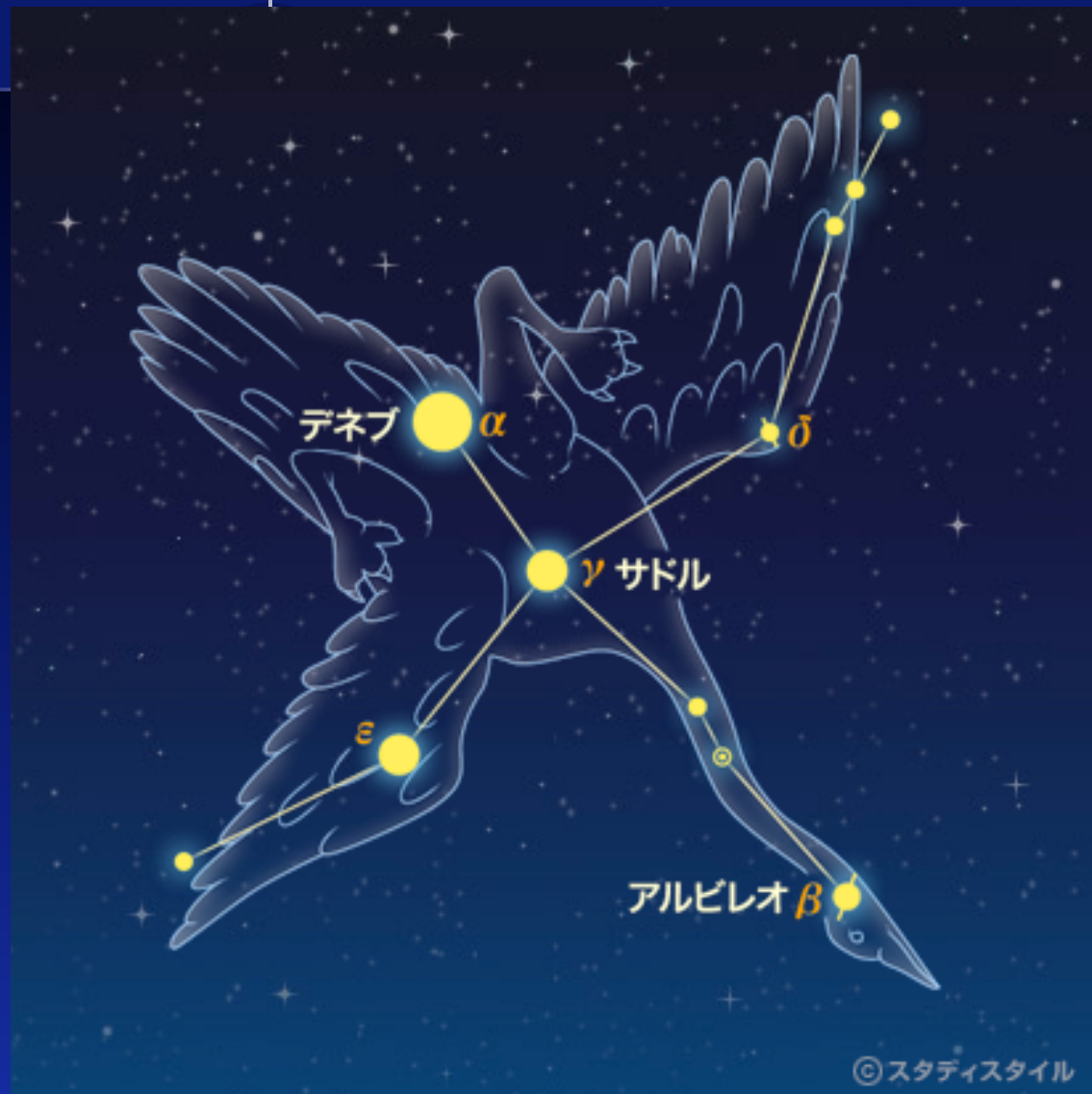


ホイーラー

表 4.1: シュヴァルツシルト半径 (対応するブラックホールの大きさ). 質量 M の物体がどの位の半径 R_{Sch} に押し込まれたらブラックホールになるか, という目安. Sgr A* は天の川銀河中心の超巨大ブラックホール.

天体	M	R_{Sch}
地球	$6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$	8.9 mm
太陽	$M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$	2.95 km
Sgr A*	$4.2 \times 10^6 M_{\odot}$	$1.24 \times 10^7 \text{ km}$

はくちょう座 X-1はブラックホール



2020年のノーベル物理学賞 受賞者

<http://www.nobelprize.org/>

“ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大

「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 (68) 独マックスプランク研究所

アンドレア・ゲズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校

「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対して」



Roger Penrose “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”

Reinhard Genzel and Andrea Ghez “for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy”.



This computer-generated image of the Milky Way—one perspective of a 3-D model newly compiled for NASA's *Galactic*—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulae.

-  Globular star cluster
 Interstellar gas and dust
 Nebulae
 Younger star region (H II stars)
 Molecular cloud
 Galactic bulge or center (other star regions)
- Reference numbers for galaxies, nebulae, and star clusters
 (Index Catalog)
 NGC (New General Catalog)
 Coordinate system centered on galactic center

Exotic halosides of the Milky Way's colorful nebulae and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Even a run-of-the-mill star may eventually produce a nebula of surpassing beauty.

Just as our sun will do in its death throes some five billion years from now, a dying star expanded into a red giant and was transformed into the nebula M2-9 (above). At its center shined

a small, hot core, which will cool and fade over time to come. Its stellar wind streams of charged particles, rushes outward in opposite directions, like exhaust from back-to-back jet engines. This phenomenon, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulae. Ultraviolet light from the star heats the gas and makes them glow.

Other types of nebulae exist in our

cloud seems to have a silver lining. The million-plus stars packed into a globular cluster such as Omega Centauri (right) are senior citizens of the Milky Way. Unlike human

Peering between dust clouds toward the central bulge of the Milky Way, the Hubble Space Telescope has seen a region in the Scutum arm (see page 20) that is home to a variety of stars of different

crushed on a rare
hot star cloud
where stars
most are older

in the sun. They sparkle like an assortment of gems on a jeweler's velvet pad. In some dark clouds lurk strange objects like G129.86-1.26, detected by European Southern Observatory telescopes in Chile and mapped in infrared light. A star

times as massive as the sun
10,000 times
brighter, it sports
a disk of circum-
stellar dust, shown
in false color,
that 20,000 times
larger than Earth's



G129.86-1.26
ESO

As stasis like the sun die, they become factories of interstellar dust. As stasis like the sun die, they become factories of interstellar dust. As stasis like the sun die, they become factories of interstellar dust.

ultraviolet light from the Hubble Space Telescope. Clouds of interstellar dust (right), seen over huge regions along the spiral arms of the Milky Way, are not thick and smoky but seem as frothy as the sand on a glass of beer. Superheated shock waves and stellar wind from

When a massive star comes to the end of its nuclear fuel supply, it collapses and its rebound in a brief, powerful explosion, or supernova, creates the debris structure. The Chinese observed these celestial fireworks in 1054, and it was recorded that the event was so bright that it was visible in broad daylight.

12 In that location today astronomers find the fast-expanding Crab Nebula (left), a remnant of a star that blew a firestorm of matter and star-whirling filaments a second.

Spiral galaxies of the Milky Way host equally remarkable celestial phenomena. In the Large Magellanic Cloud (right), 180,000

Earth's clumpy, filamentary clouds of hydrogen gas reveal their stately march in a radio map from the Australia Telescope Compact Array. The heart half of the image shows the glowing toward the Earth spiral arms of the Milky Way.

Glowing along the spiral arms of the galaxy's bright emission radiate mark regions where new stars are born. The Compact Nebula shown at right is 6,000 light years distant, as well as detected with the radio eyes as a faint spot in the southern constellation of Puppis. White-field intruders show that it covers more of

the sky than does the full moon. Where there was once only a vast dark cloud, radiation from the brightest and most massive young stars in the nebula, March 26, heating and ionizes the gas across a wide region. Despite the brilliance of the Lagoon Nebula and similar objects like the famous Orion Nebula, such areas are usually little more than hot blisters on the surface of giant interstellar clouds.

With new tools, astronomers are unraveling the nature of the Milky Way and measuring distances to stars and nebulae with greater accuracy. Still, they ask, how did the Milky Way form in the first place? How and where did the arms form? How many more planets circle nearby stars besides the 52 already discovered? And the biggest question of all: Do any of them harbor life?

A close-up photograph of a person's face, likely a woman, with a prominent red mark on the forehead. The image is somewhat blurry and has a warm, reddish tint.

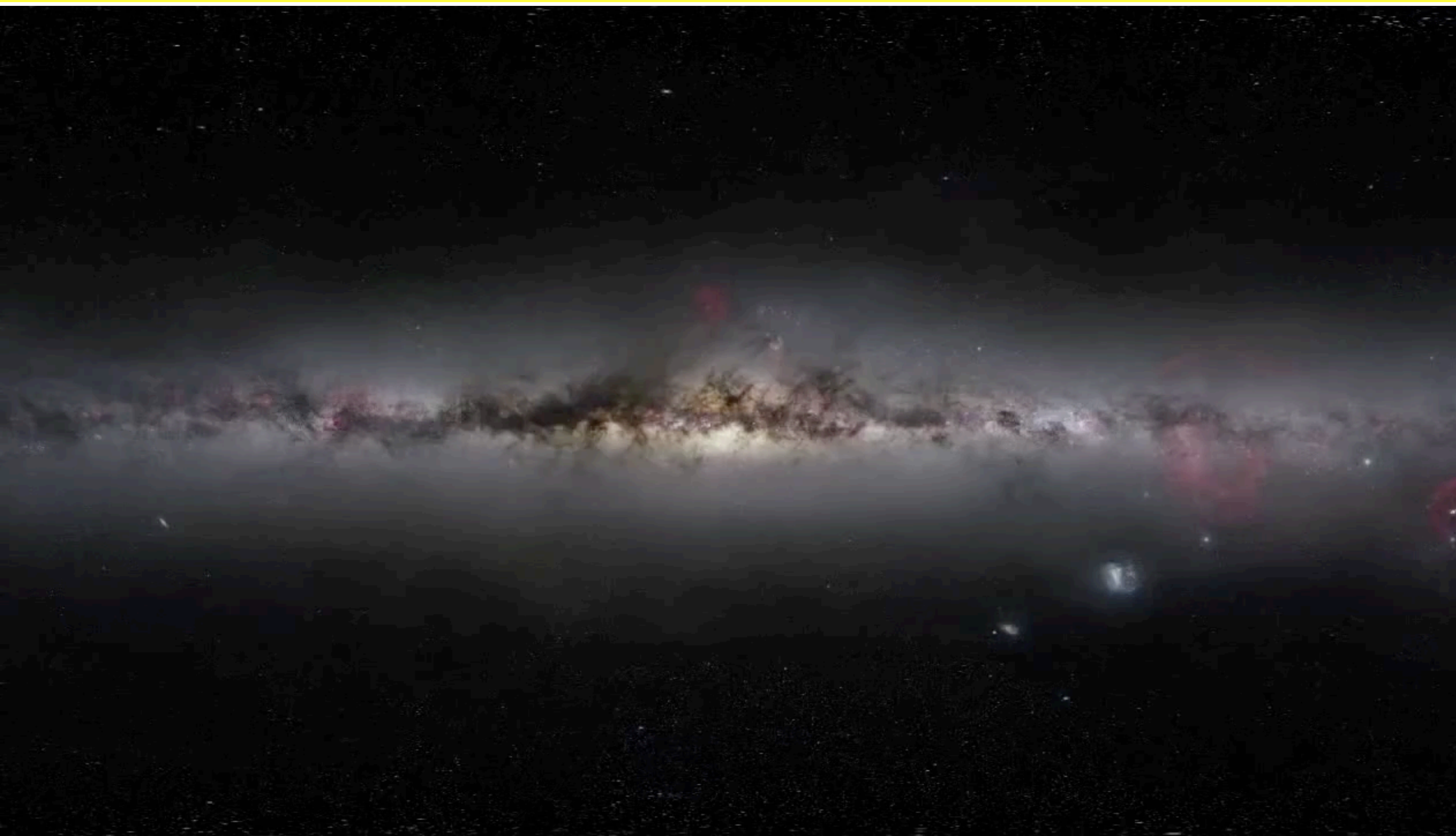
the galaxy than does the Milky Way, which is only a tiny fraction of the billions of stars in the massive young star-forming region. The Orion Nebula is a wide region, stretching about 1,000 light-years across. The Orion Nebula is the famous Orion Nebula, which is usually little more than a faint, fuzzy patch of light in the sky.

With new tools, astronomers are probing the nature of the universe by measuring distances with greater accuracy than ever. How and when did the Milky Way form? How many more planets exist besides the 102 already known? What is the biggest question in astronomy today? These are the questions that will define the next generation of astronomy.

ers are un-
Way and
s and melba
they ask, how
a first place?
turn? How
early starts
covered? And
to any of

For information regarding available maps call 1-800-962-3543 or write to National Geographic Maps, PO Box 4307, Englewood, CO 80157-4307. You can find us on the Internet at nationalgeographic.com/maps

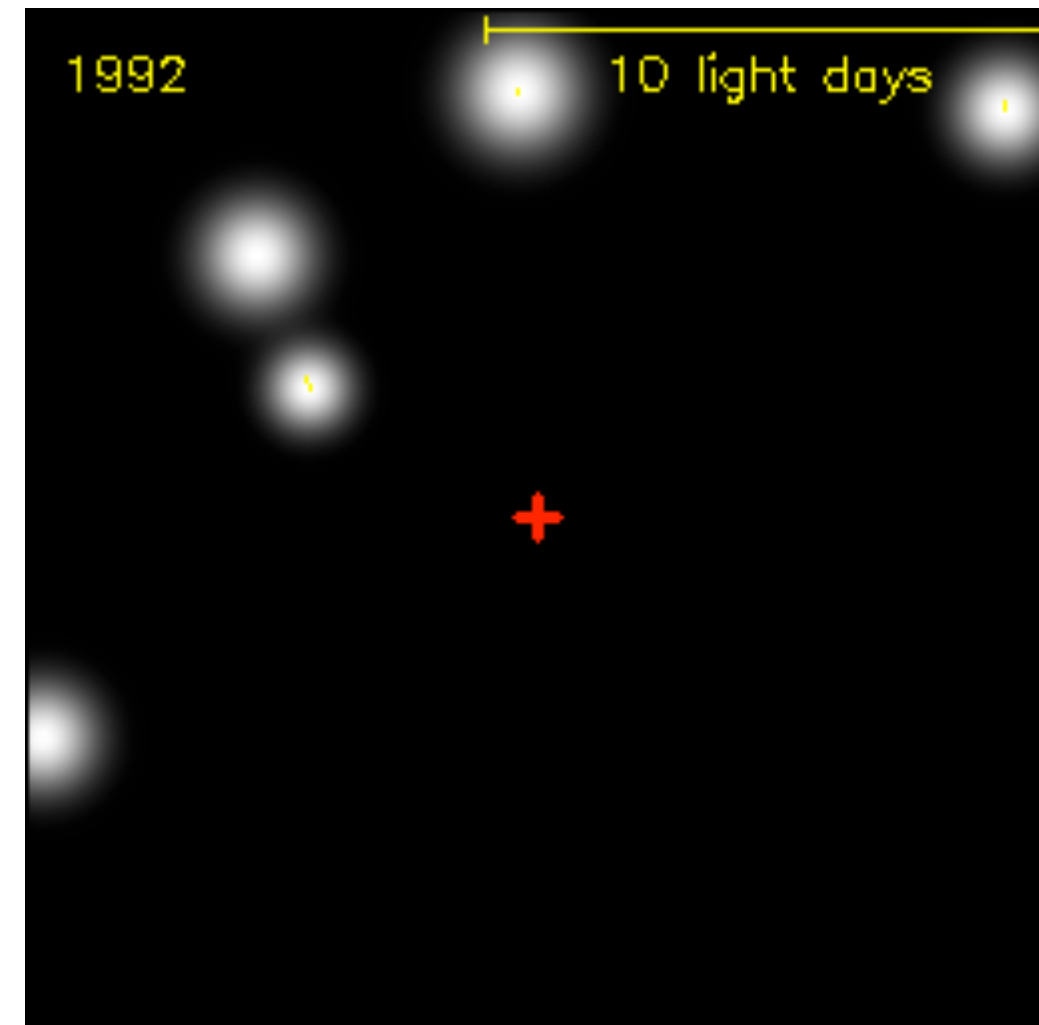
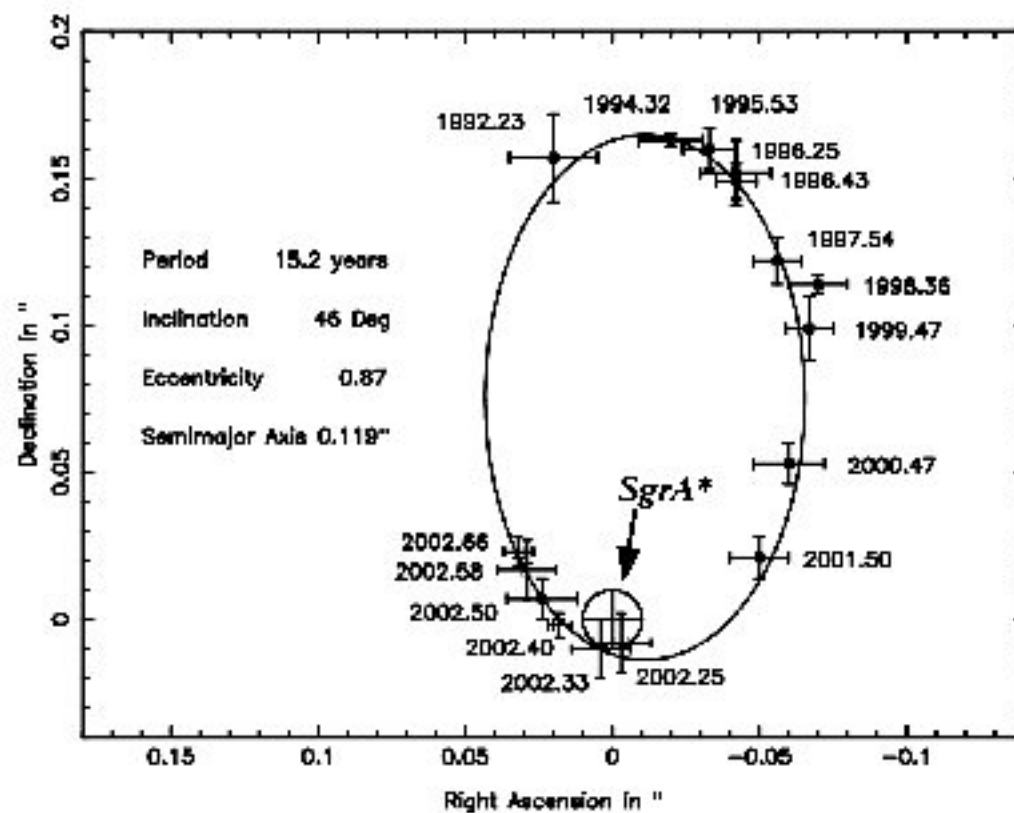
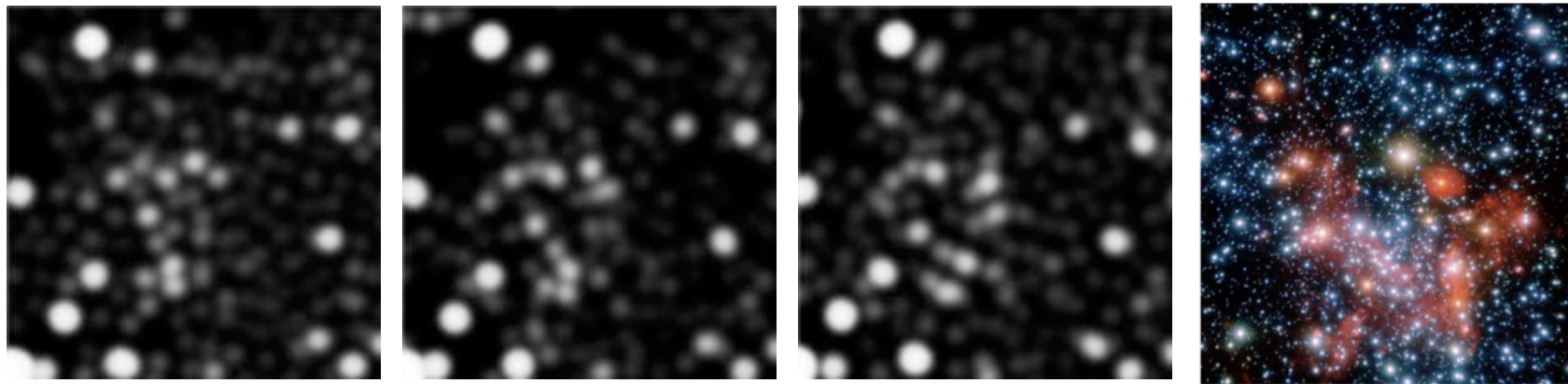
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

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

S2 orbit around Sgr A*



<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

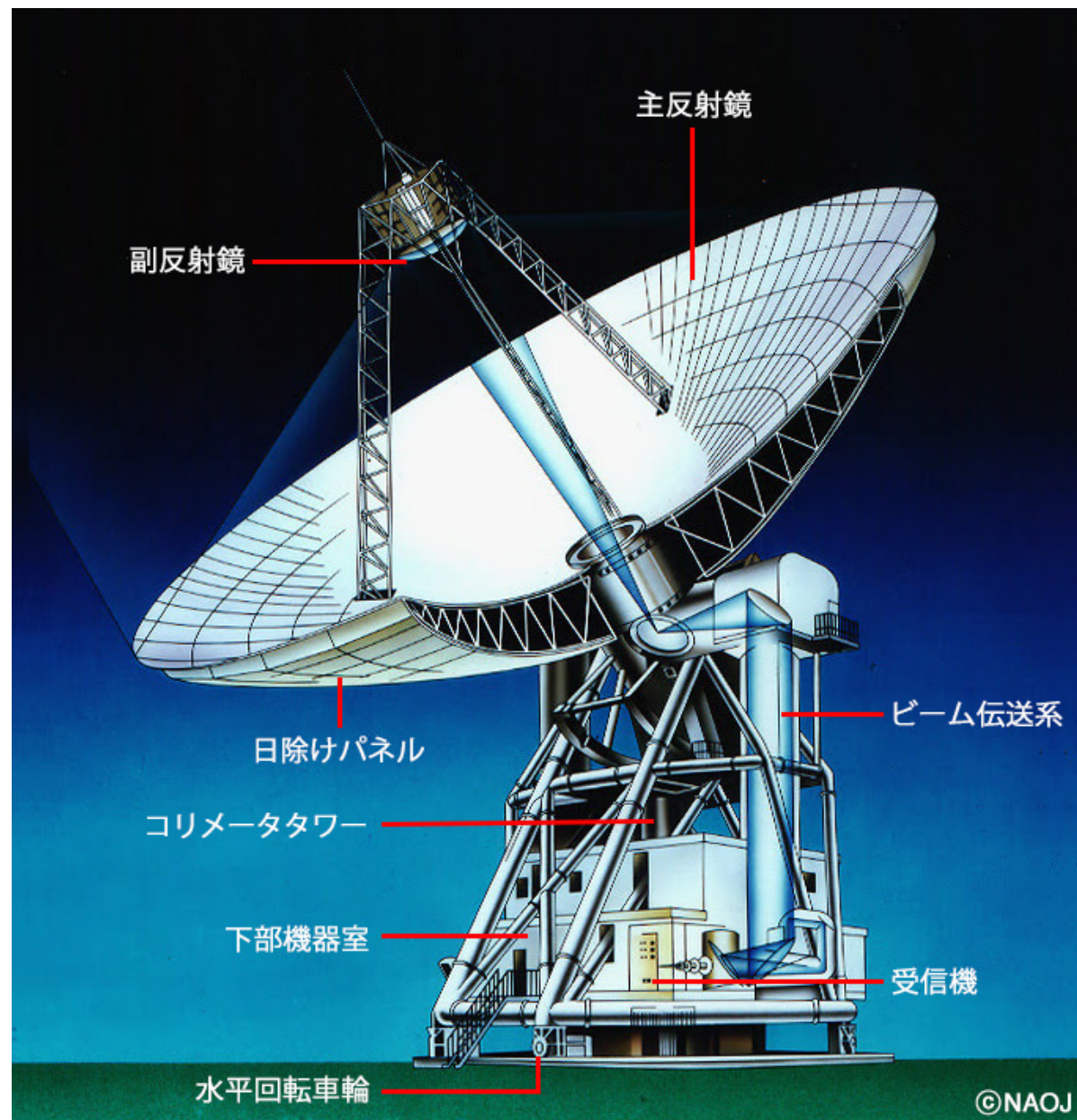
2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



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



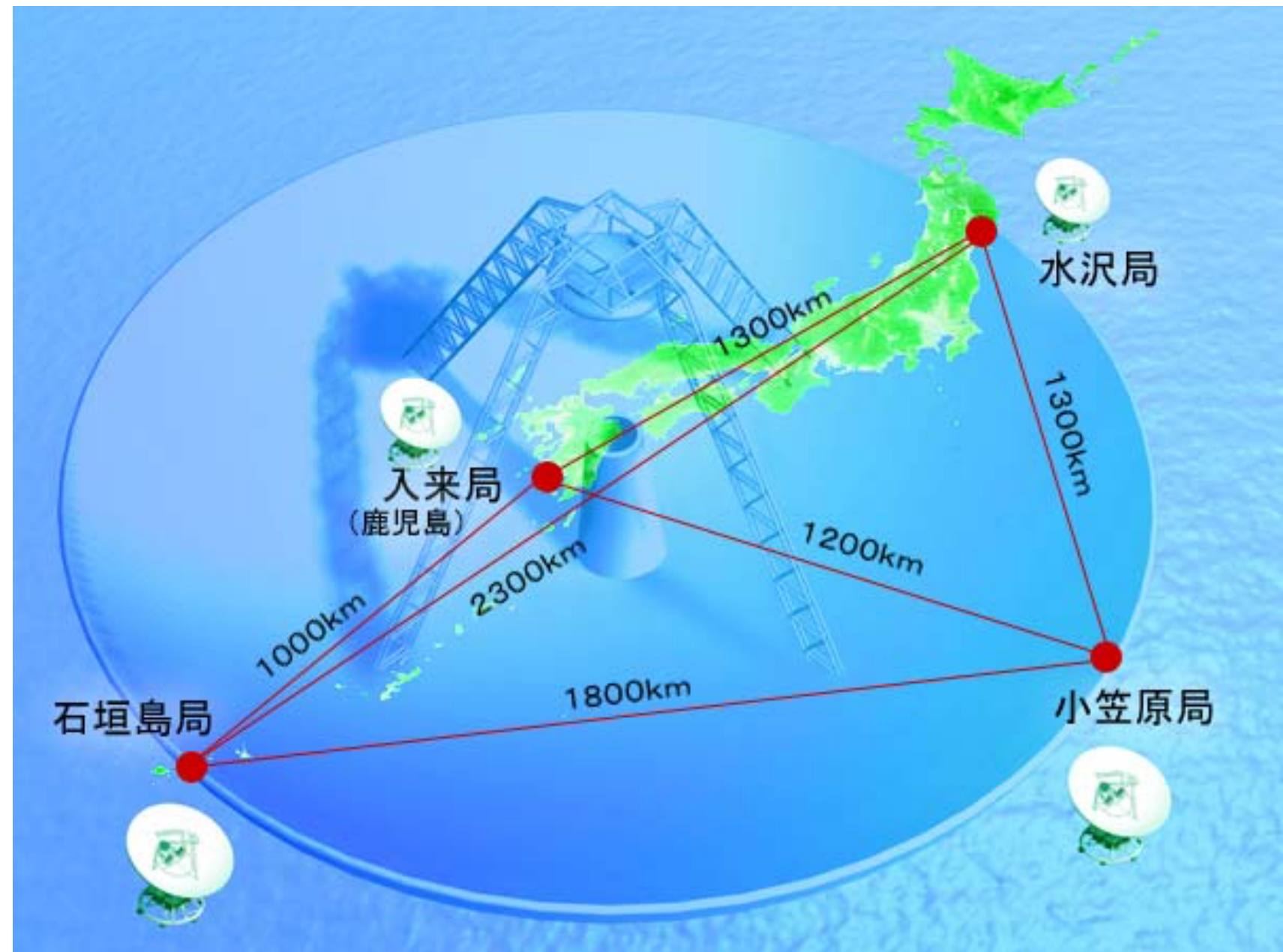
$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

野辺山45m望遠鏡

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>

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eh.html>



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.

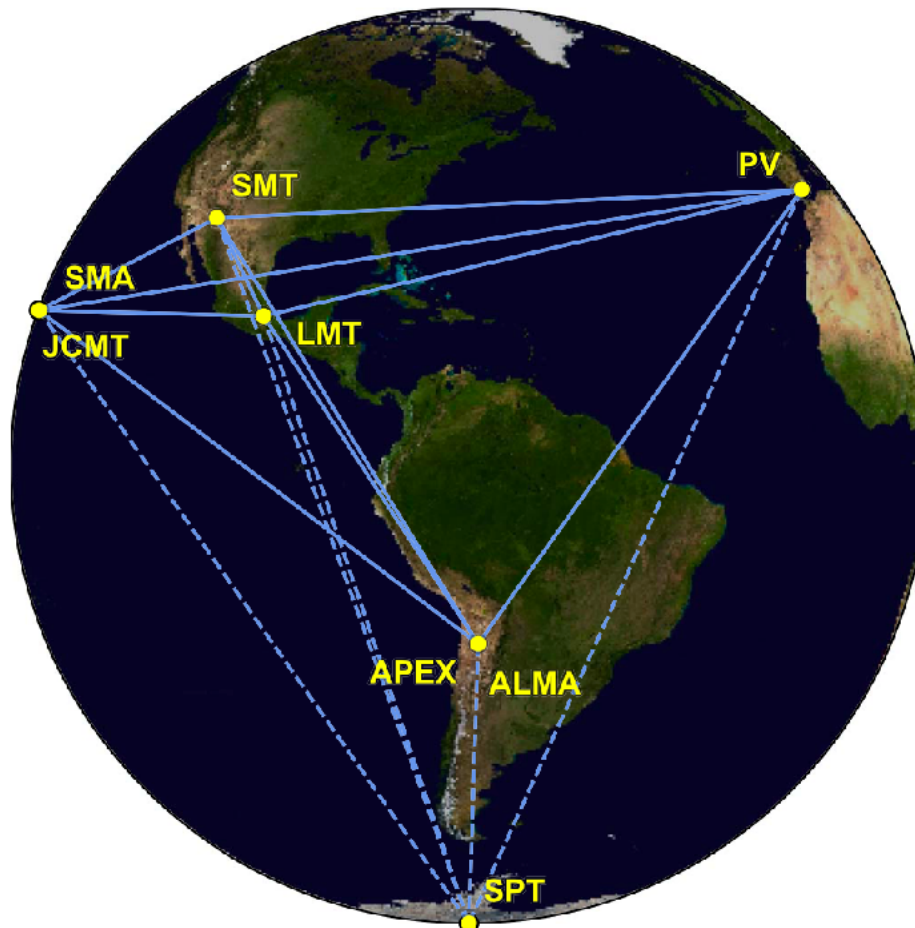


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

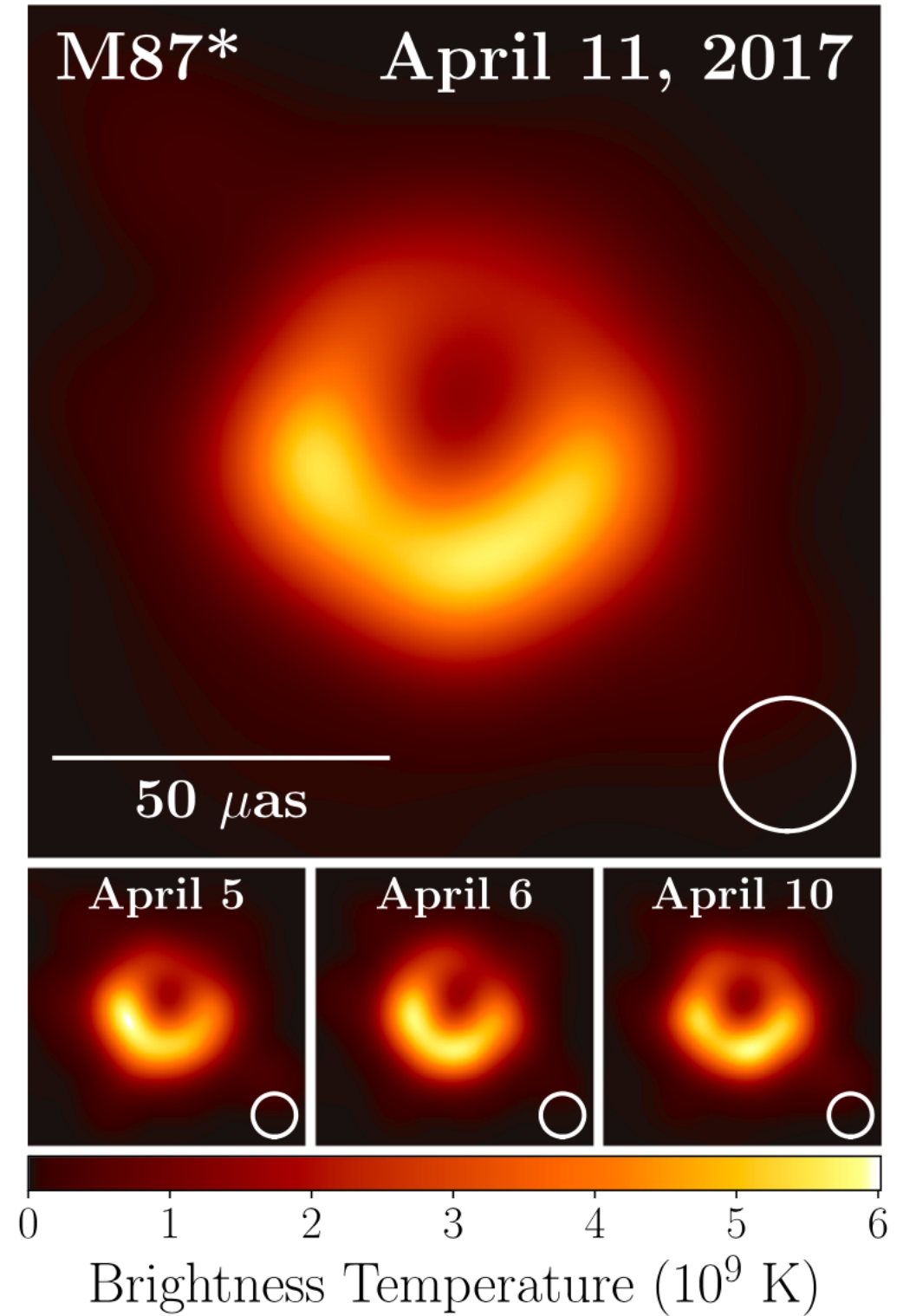


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the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

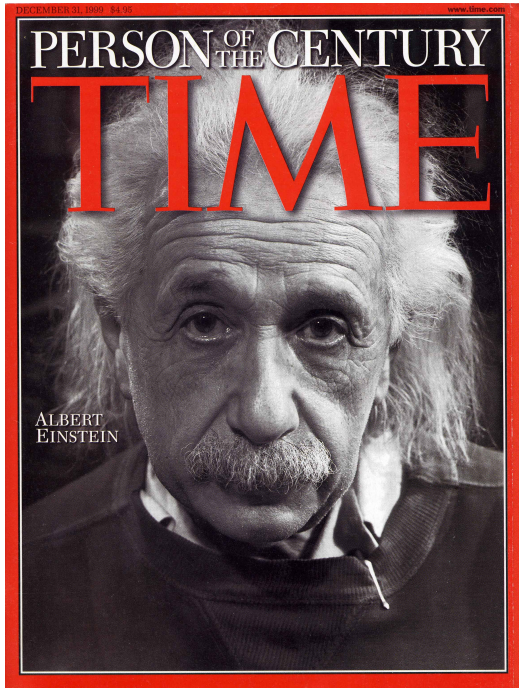
ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

EHT image

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

0'58"

100歳を超えた相対性理論



Time
1999/12/31

1. 2つの相対性理論
2. ブラックホールの観測
3. **重力波の検出**
4. 時計を使った相対性理論の検証



IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...

THINGS THAT HAVE MASS CAUSE THAT RUBBER SHEET TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE.

THE MORE MASS, THE MORE THAT SPACE GETS BENT AND DISTORTED BY GRAVITY.

JORGE CHAM © 2016

FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.

IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.

THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.

GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, CHANGING THE DISTORTION OF SPACE.

EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.

IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER, WE WOULD ALSO CAUSE RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

AND ANYTIME THERE'S A NEW WAY TO INVESTIGATE THE UNIVERSE WE DISCOVER THINGS THAT WE DIDN'T EXPECT.

IT'S REALLY ABOUT LOOKING FOR NEW THINGS THAT WE DIDN'T KNOW EXISTED...

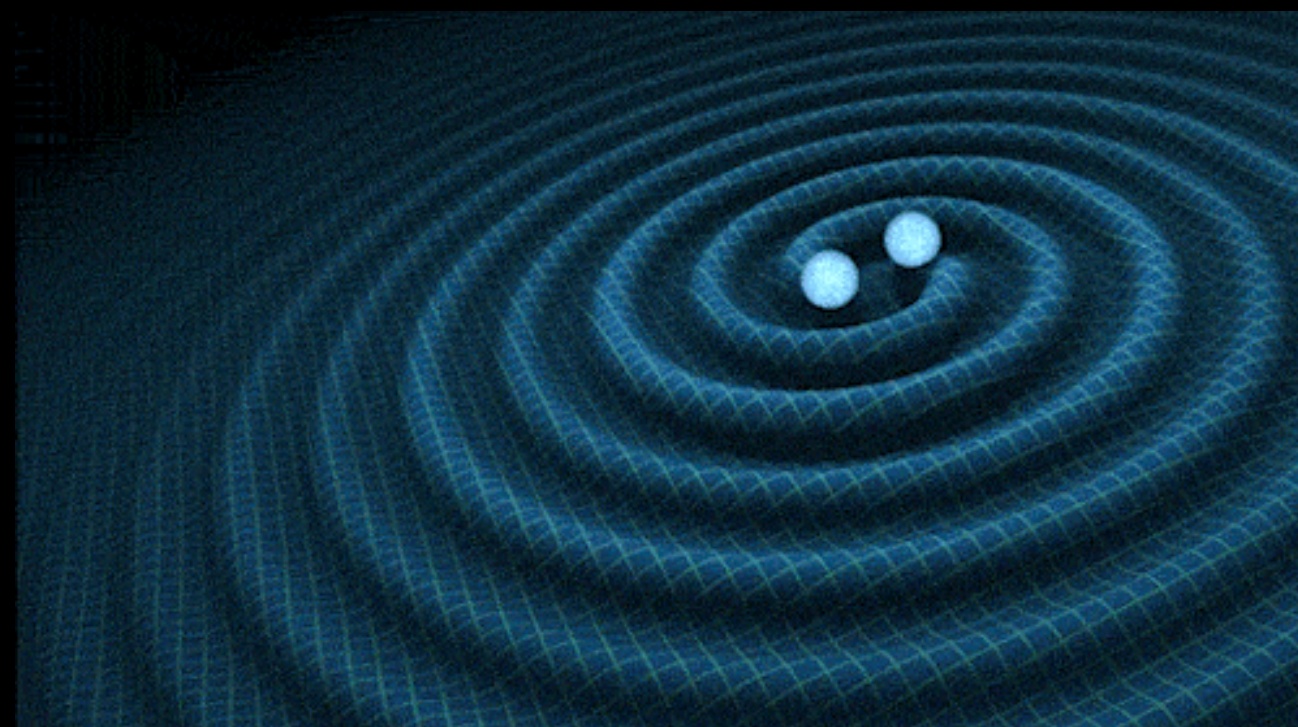
...EXAMINING THE EXTREME EDGES OF OUR KNOWLEDGE OF PHYSICS...

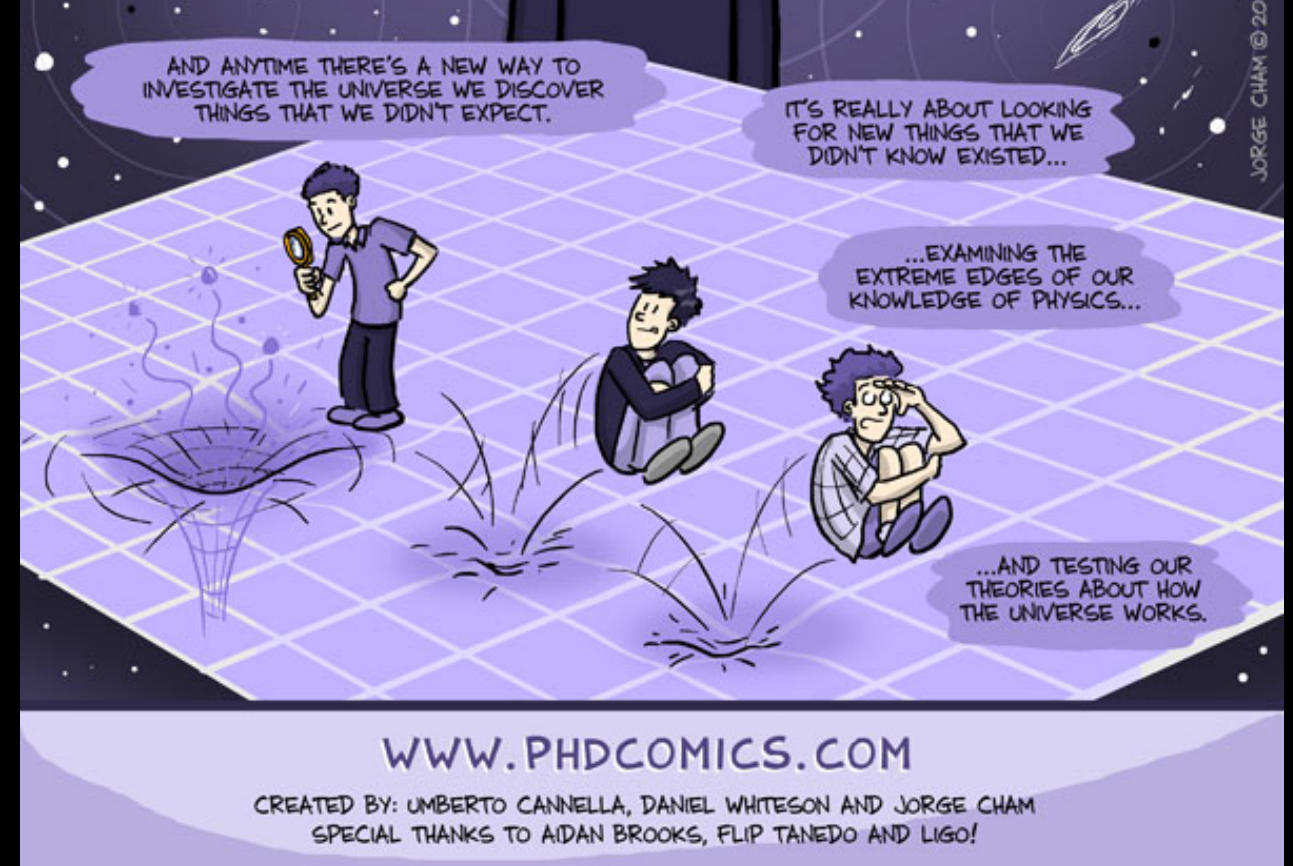
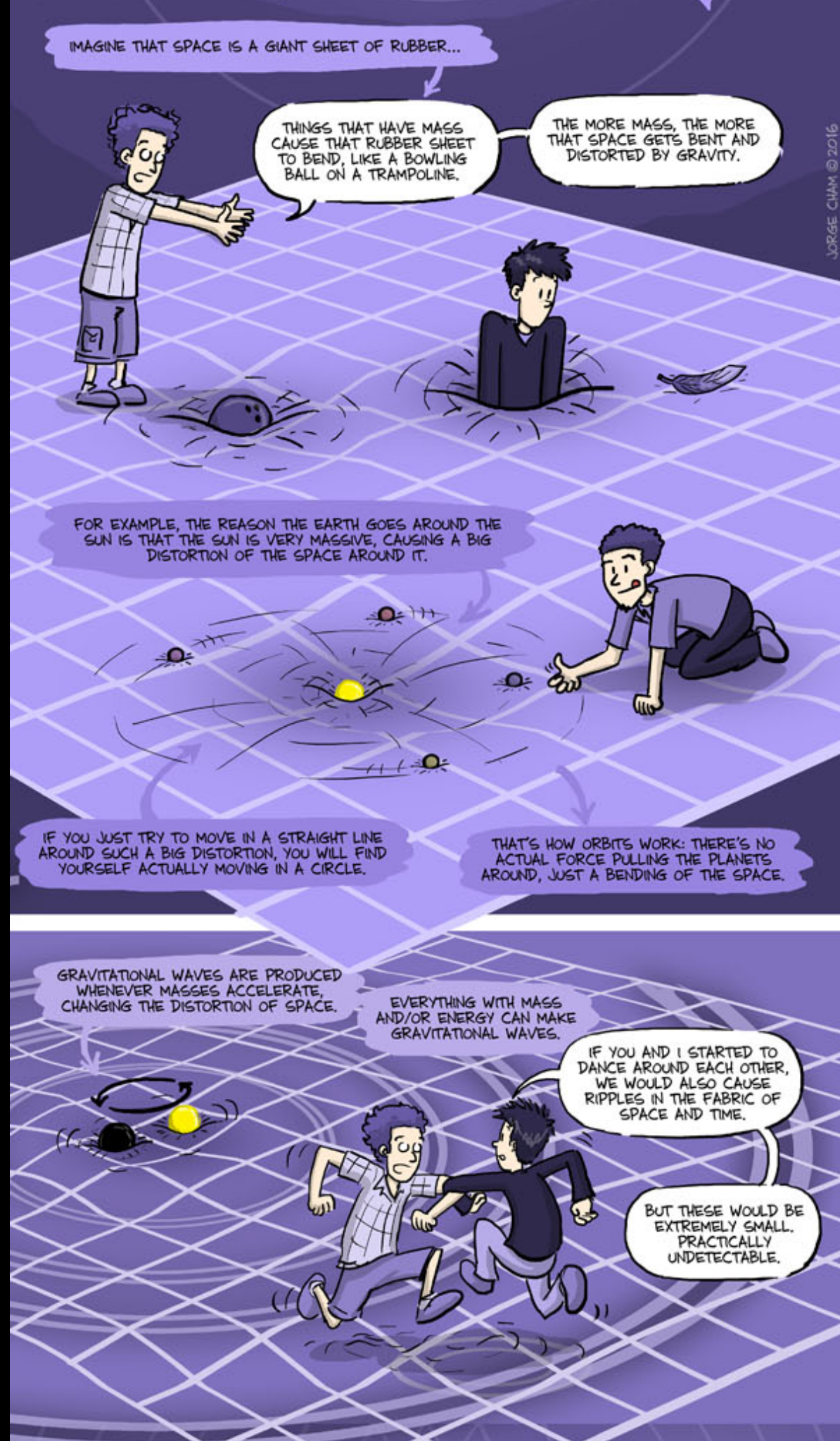
...AND TESTING OUR THEORIES ABOUT HOW THE UNIVERSE WORKS.

JORGE CHAM © 2016

WWW.PHDCOMICS.COM

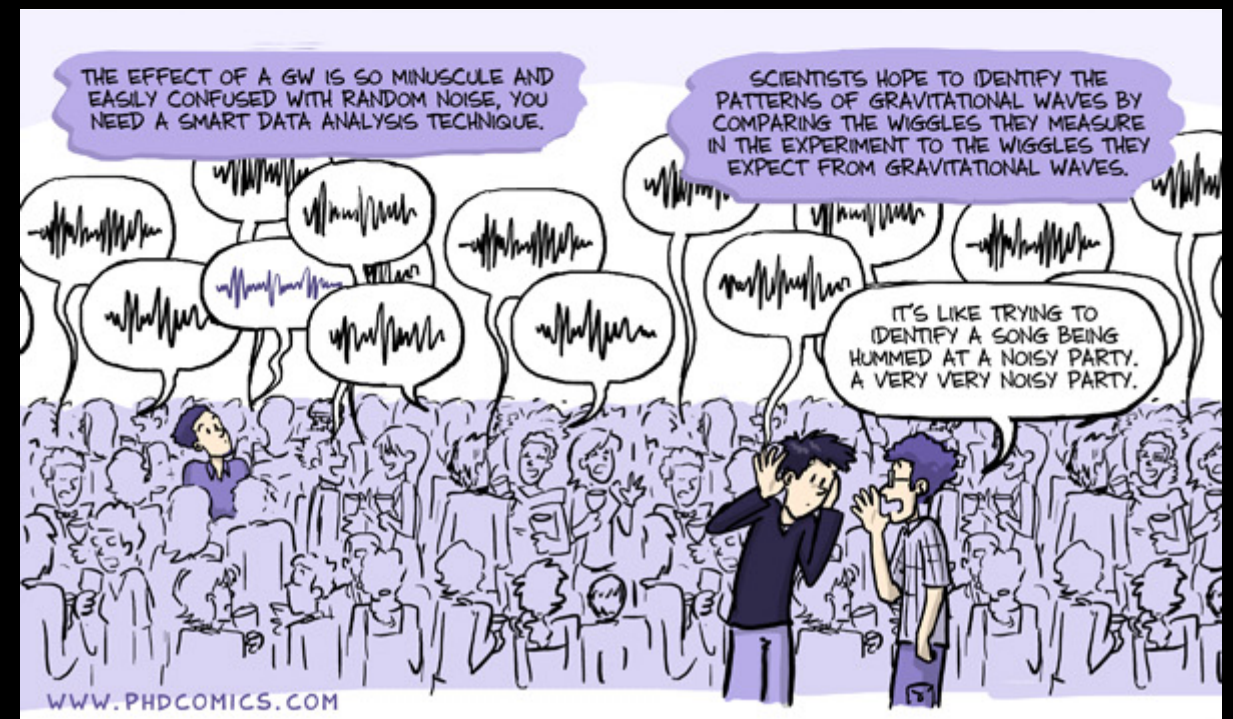
CREATED BY: UMBERTO CANNELLA, DANIEL WHITESON AND JORGE CHAM
SPECIAL THANKS TO AIDAN BROOKS, FLIP TANEDO AND LIGO!

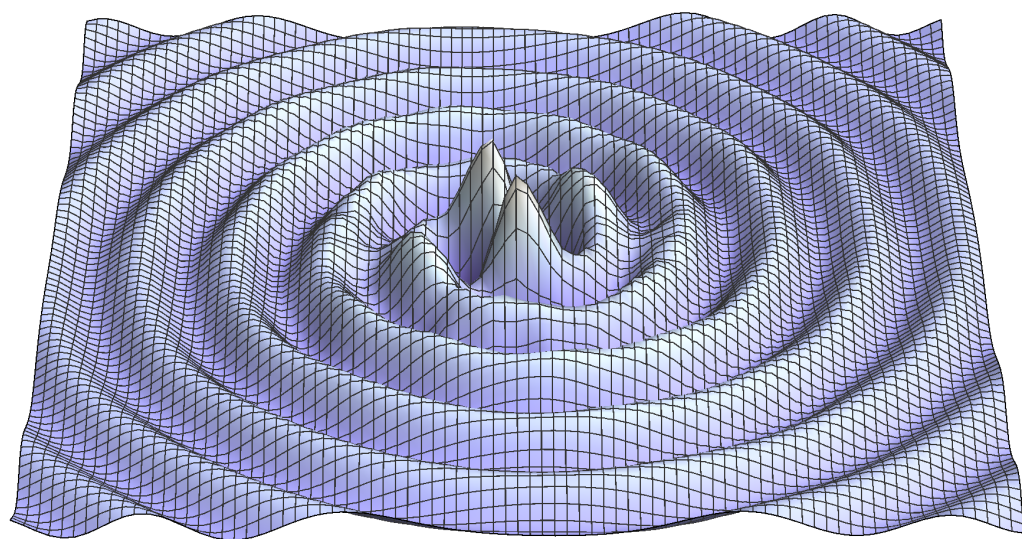




www.phdcomics.com

“gravitational waves explained”





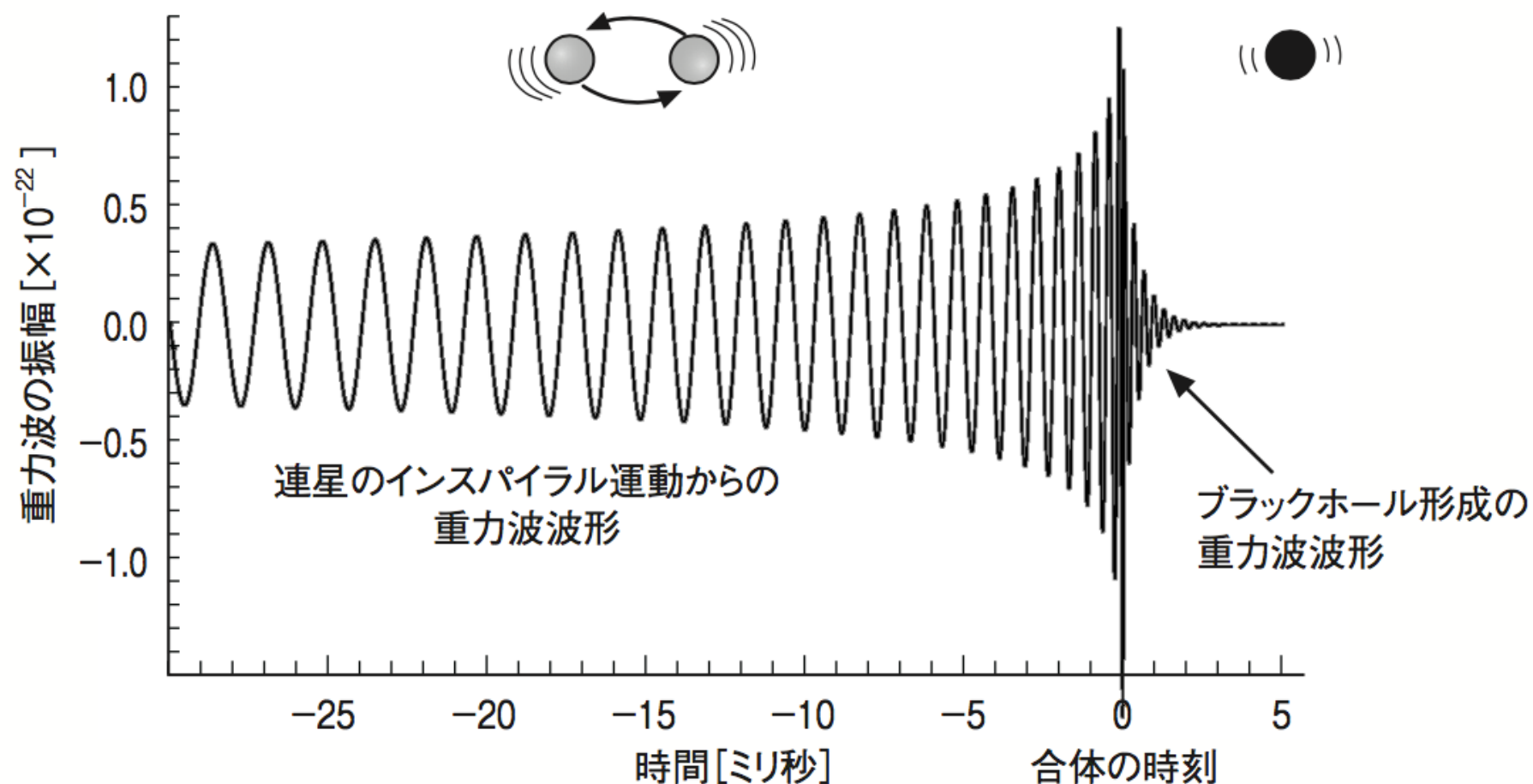
重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星
連星ブラックホール

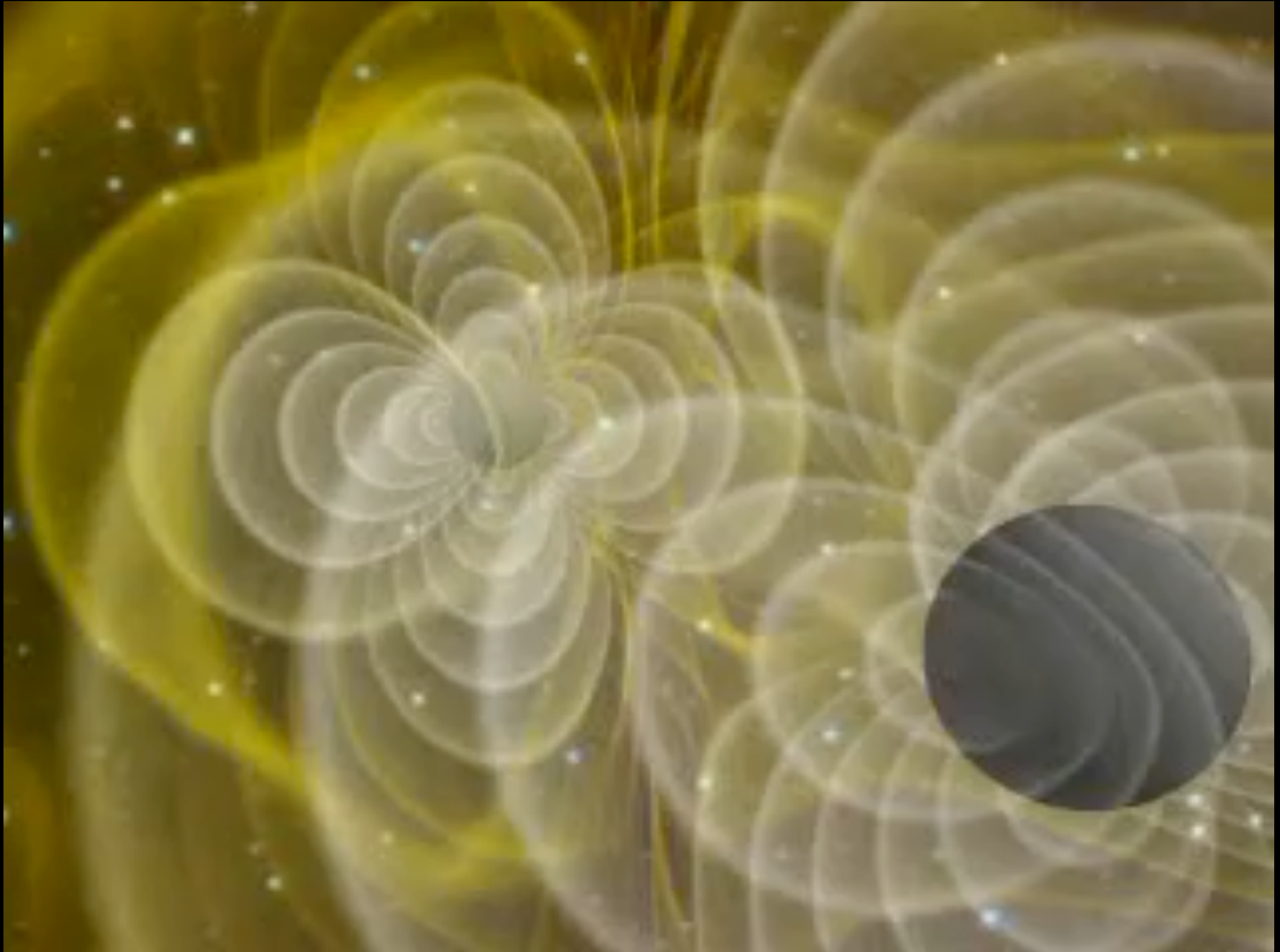
インスパイラル

合体

リングダウン



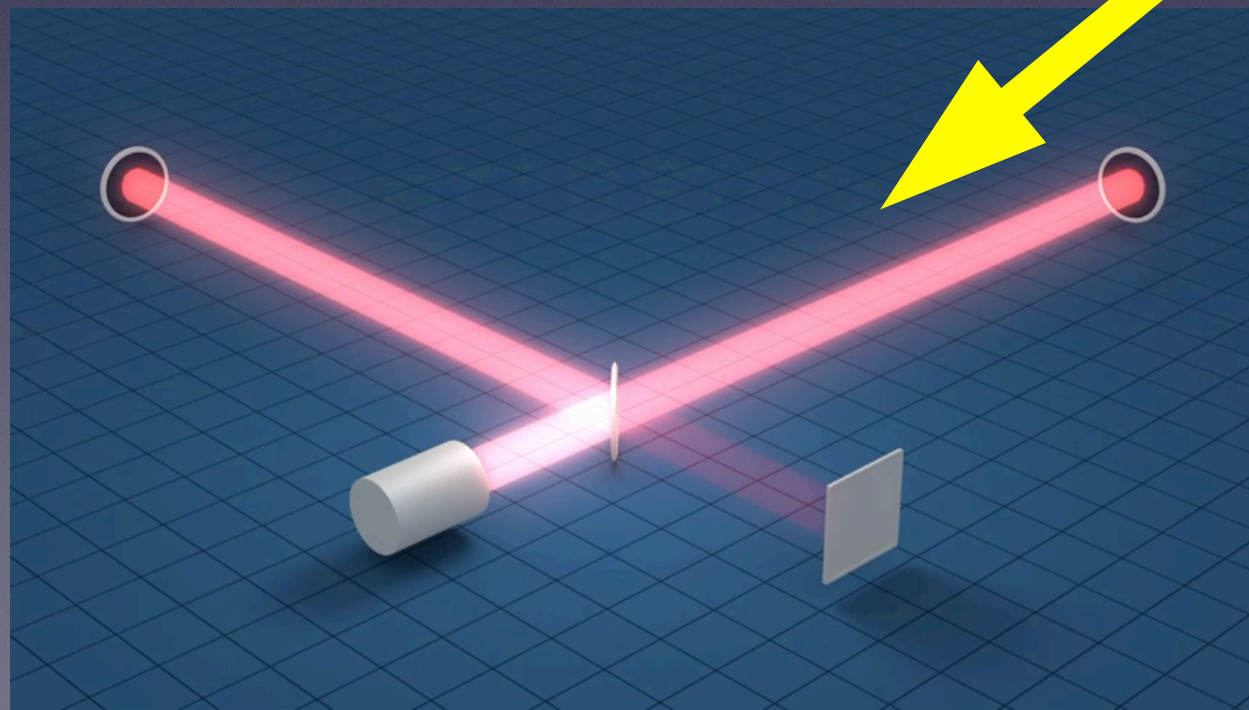
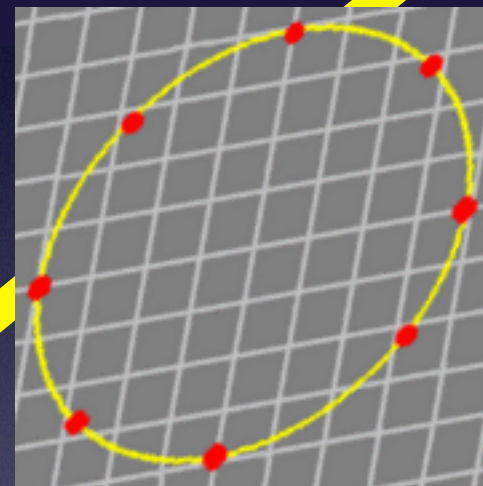
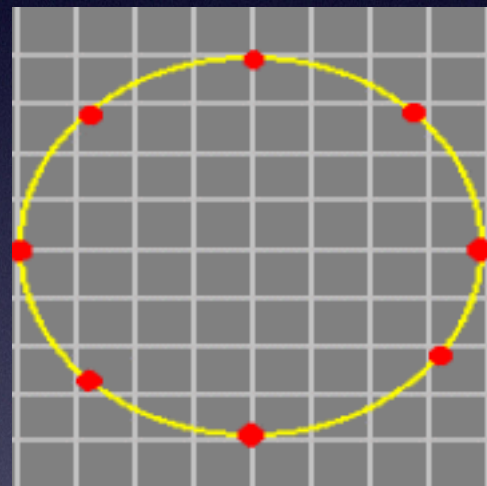
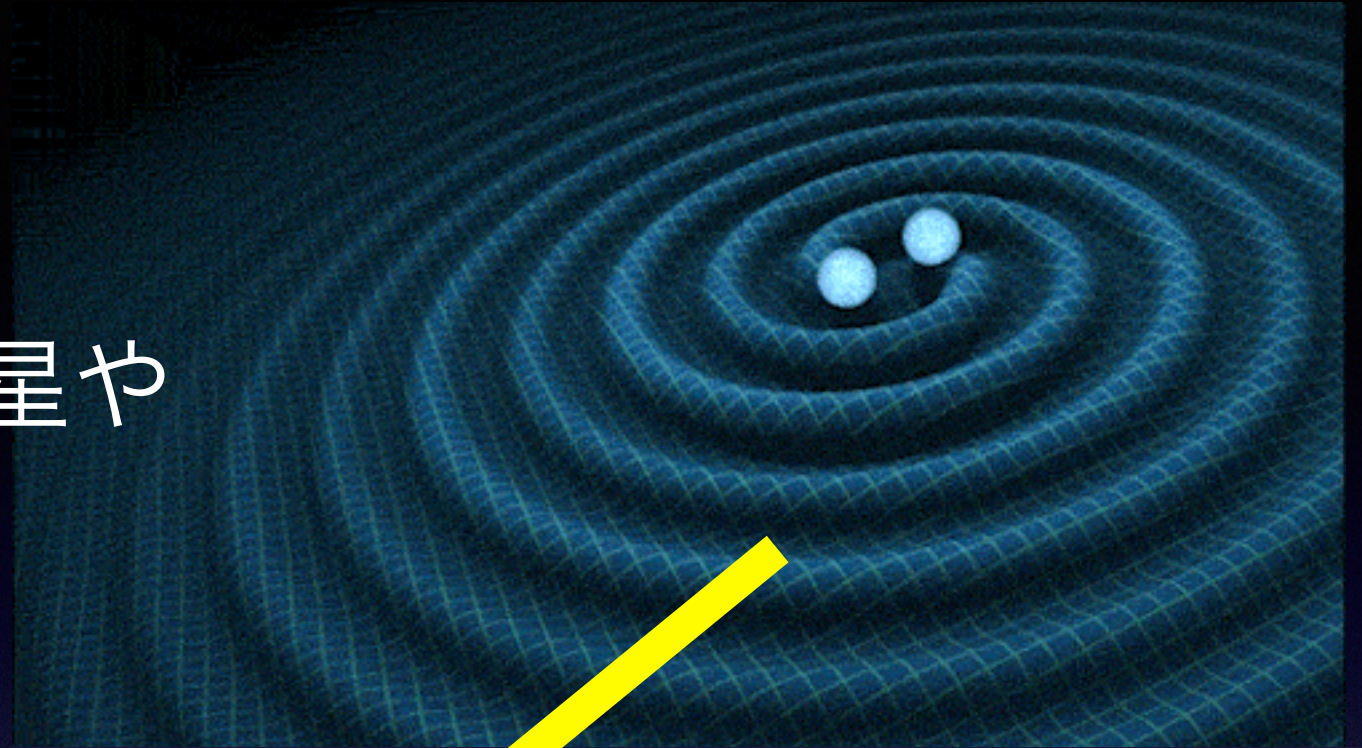
ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

重力波の発生と伝播

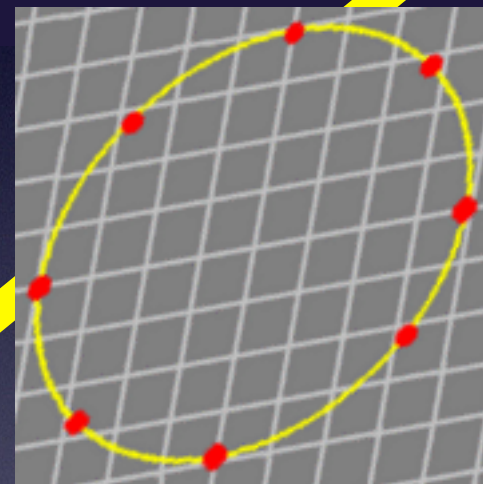
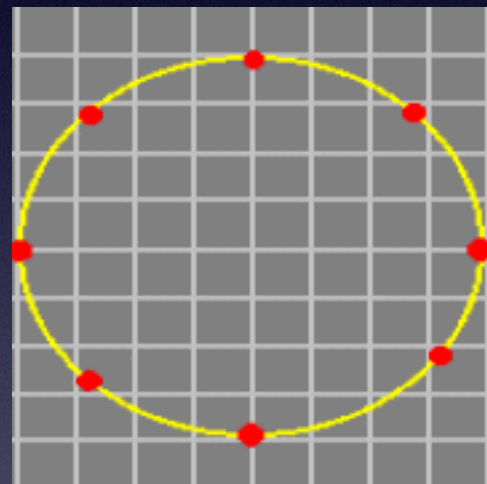
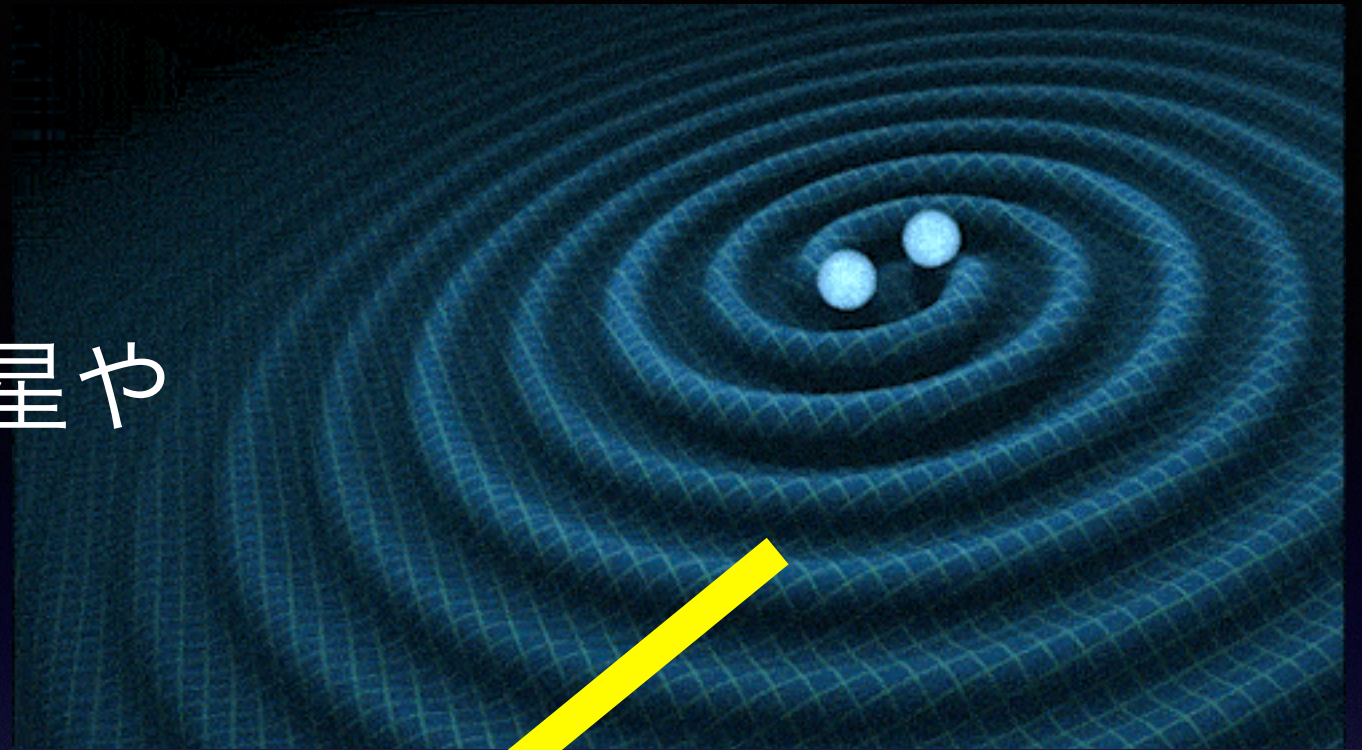
ブラックホール連星や
中性子星連星



レーザー干渉計

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

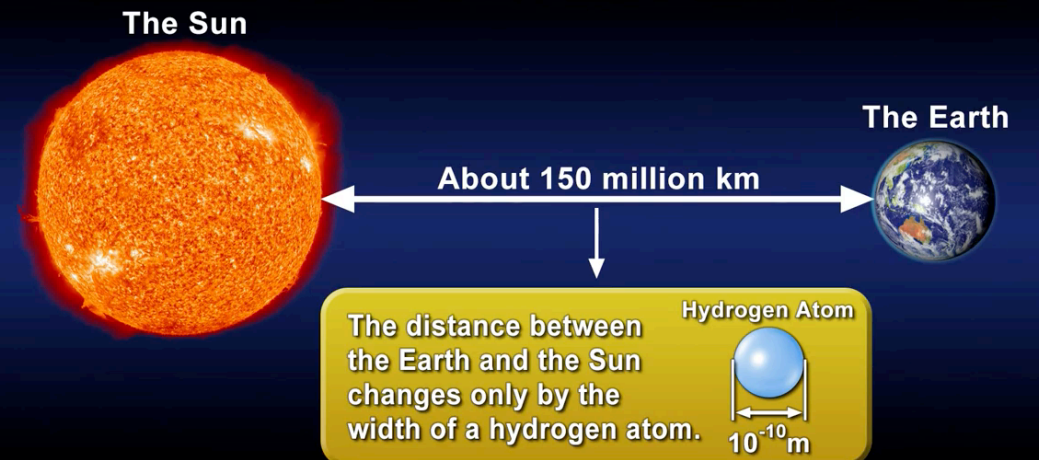


レーザー干渉計

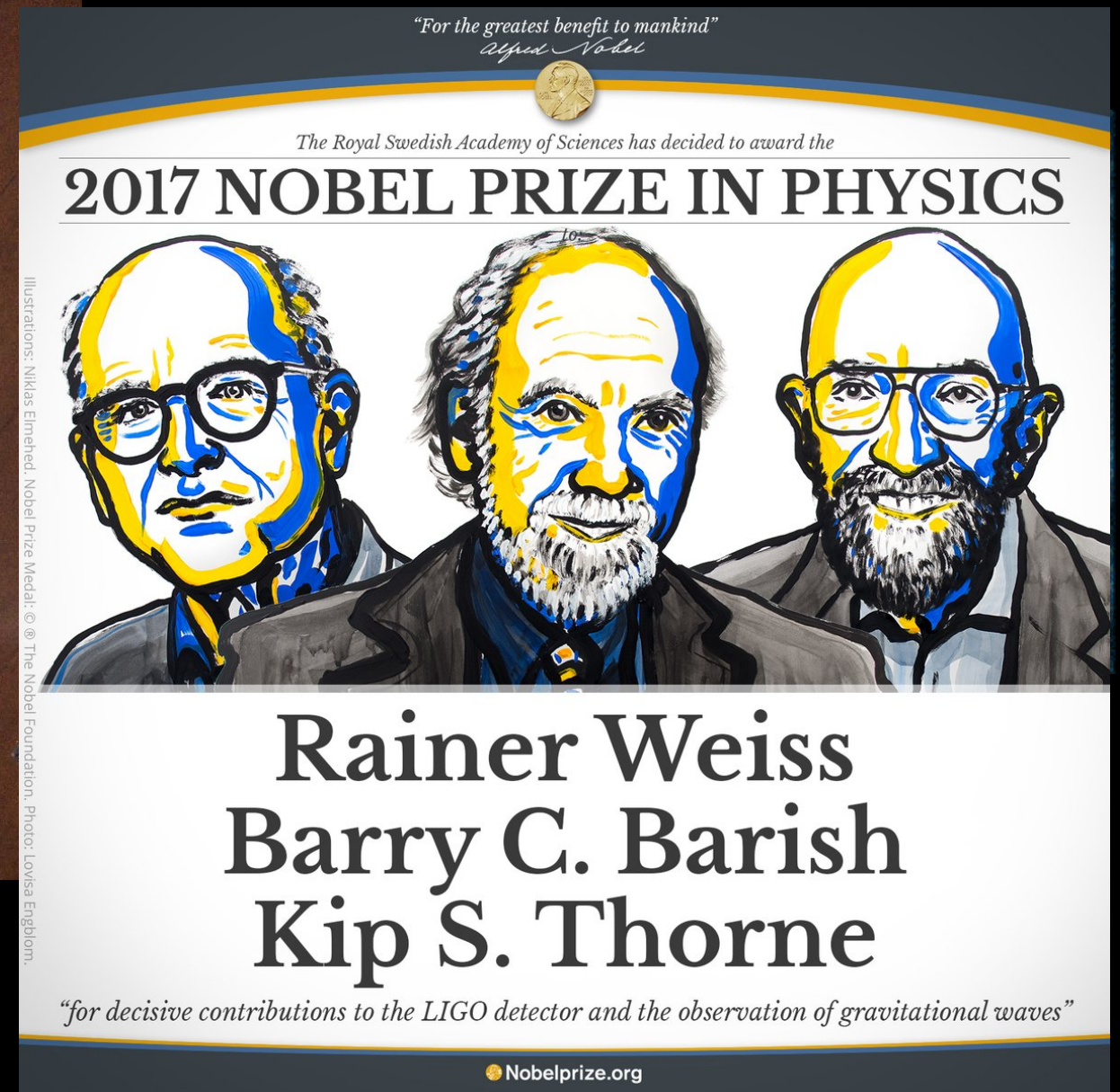


典型的な振幅は 10^{-22}

Effect of Gravitational Waves



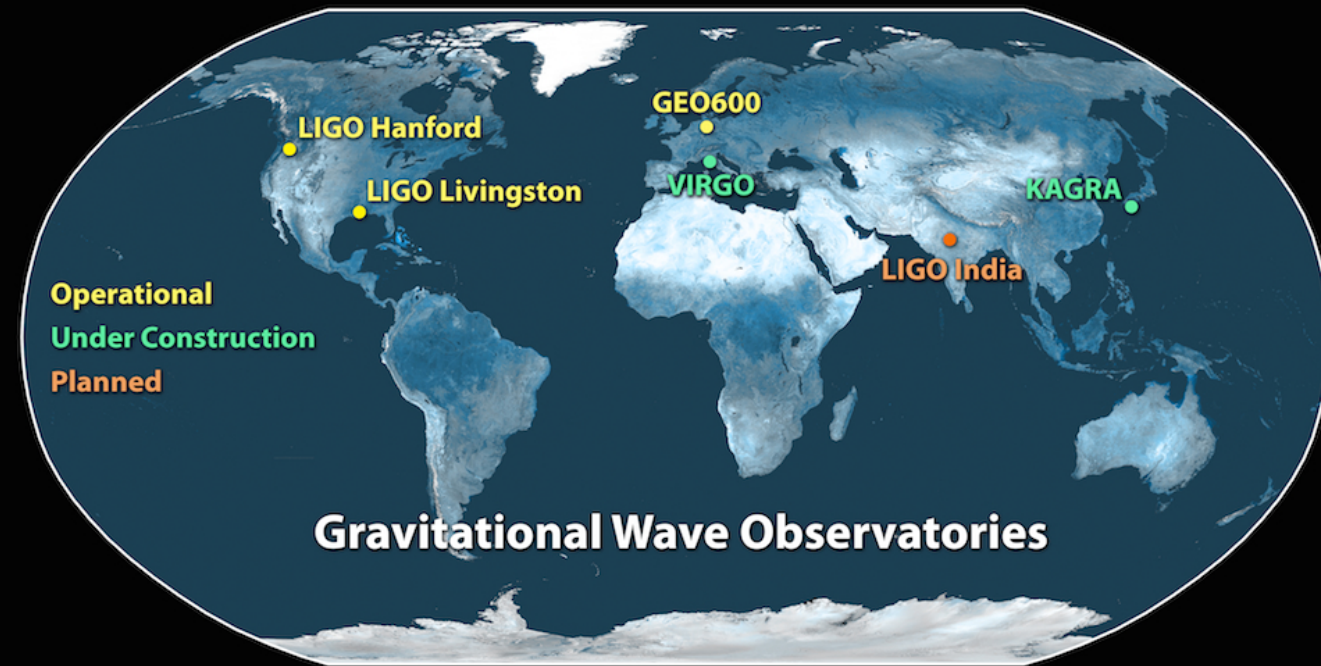
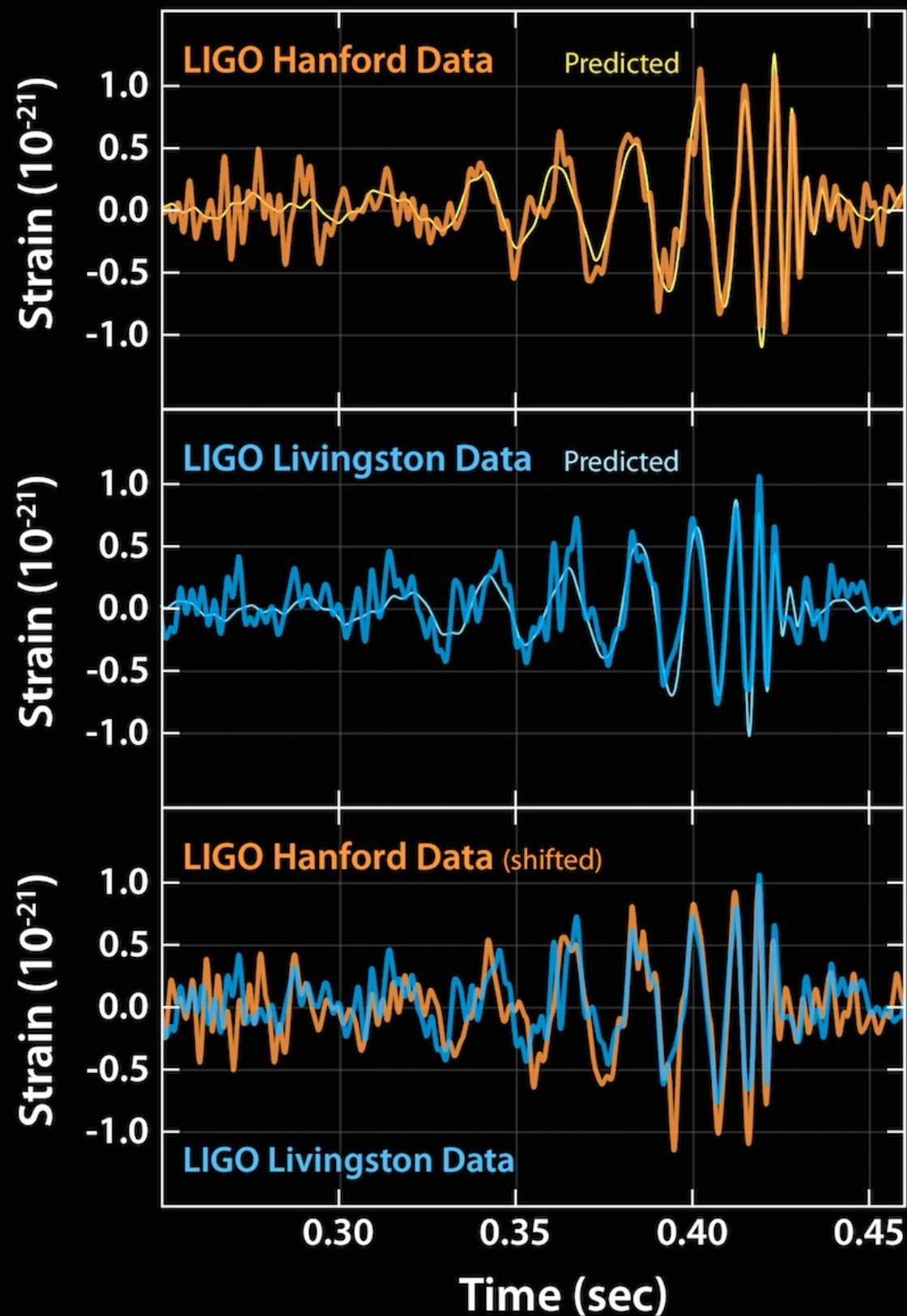
2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



翌年には重力波プロジェクトを
リードした3人にノーベル物理学賞

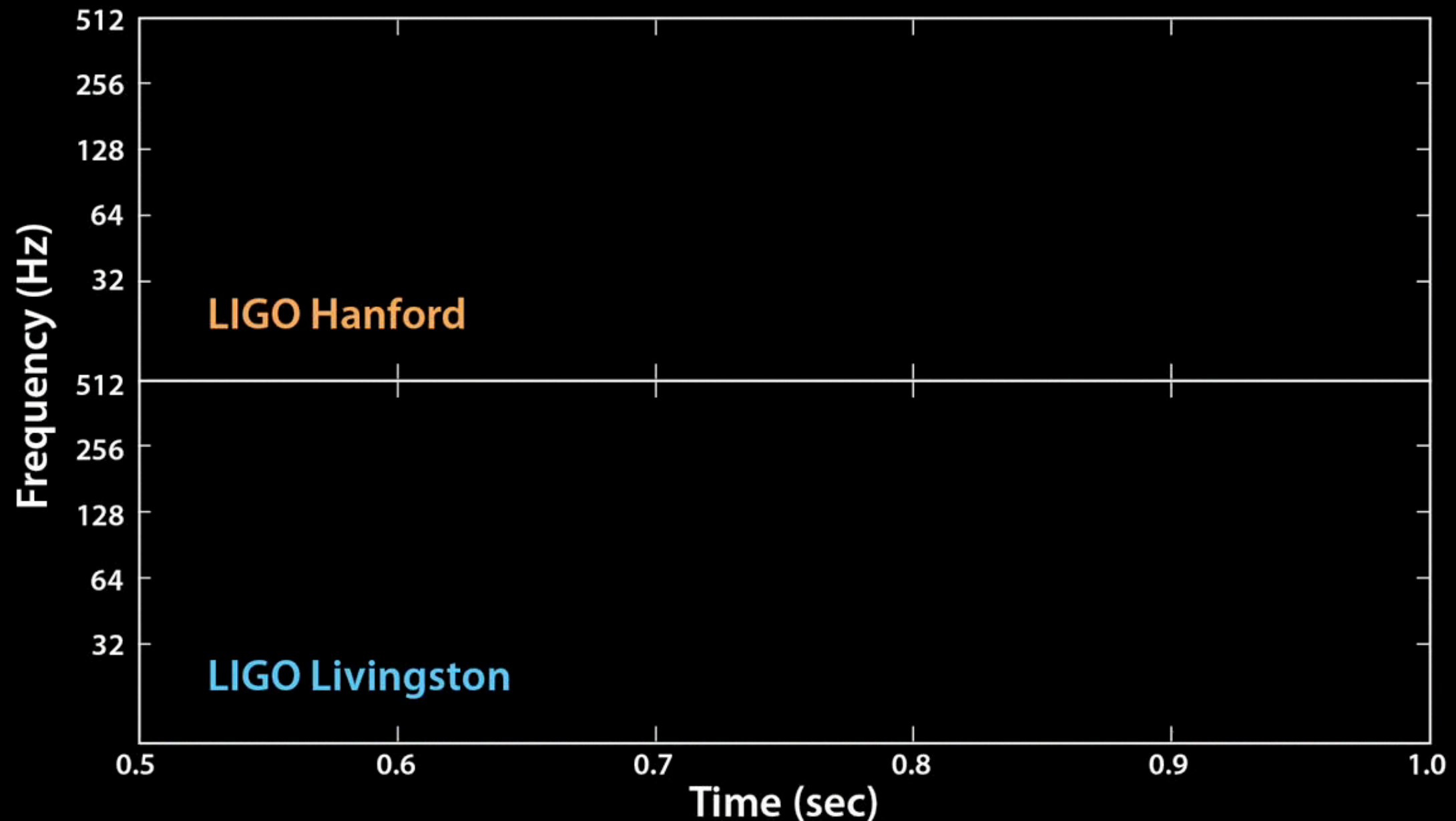
四国新聞だけ ちがった... 残念 (笑)

2015年9月14日



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

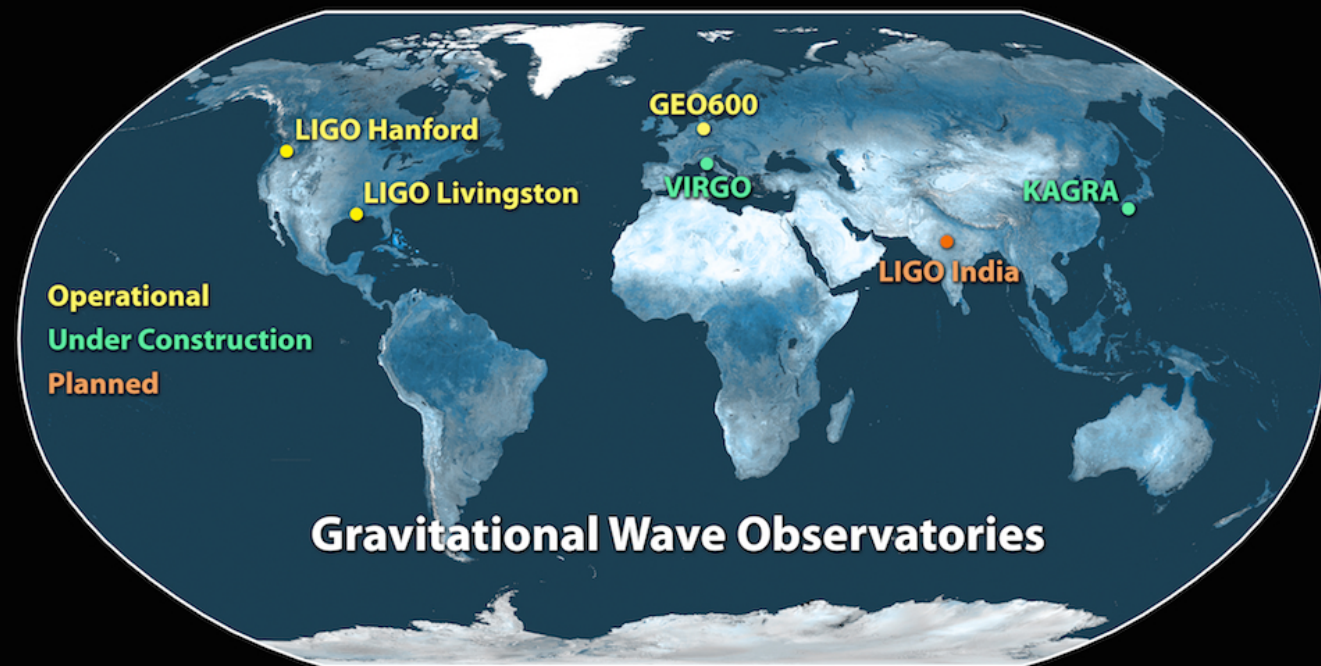
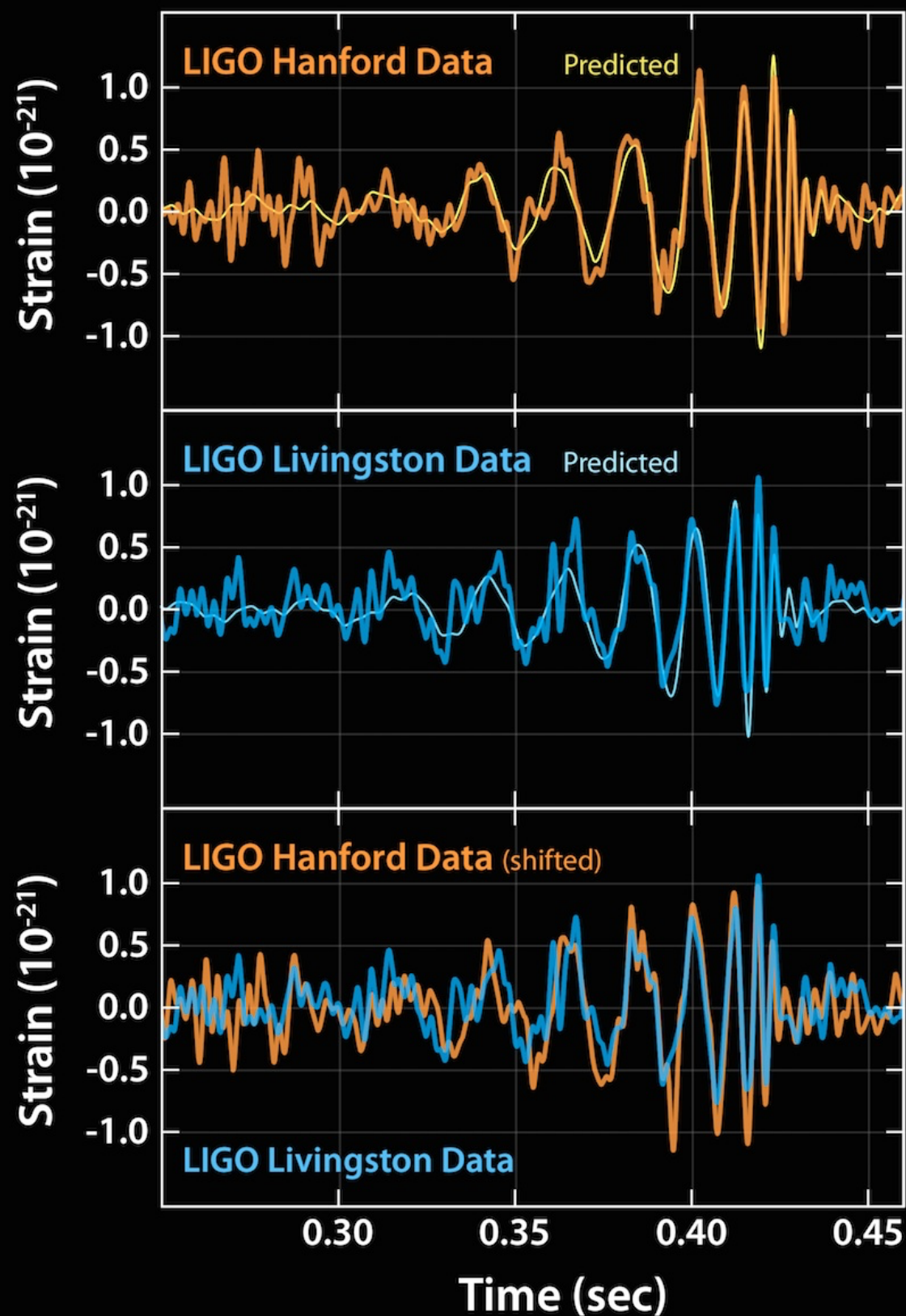
重力波波形を音にすると. . .



はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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

2015年9月14日

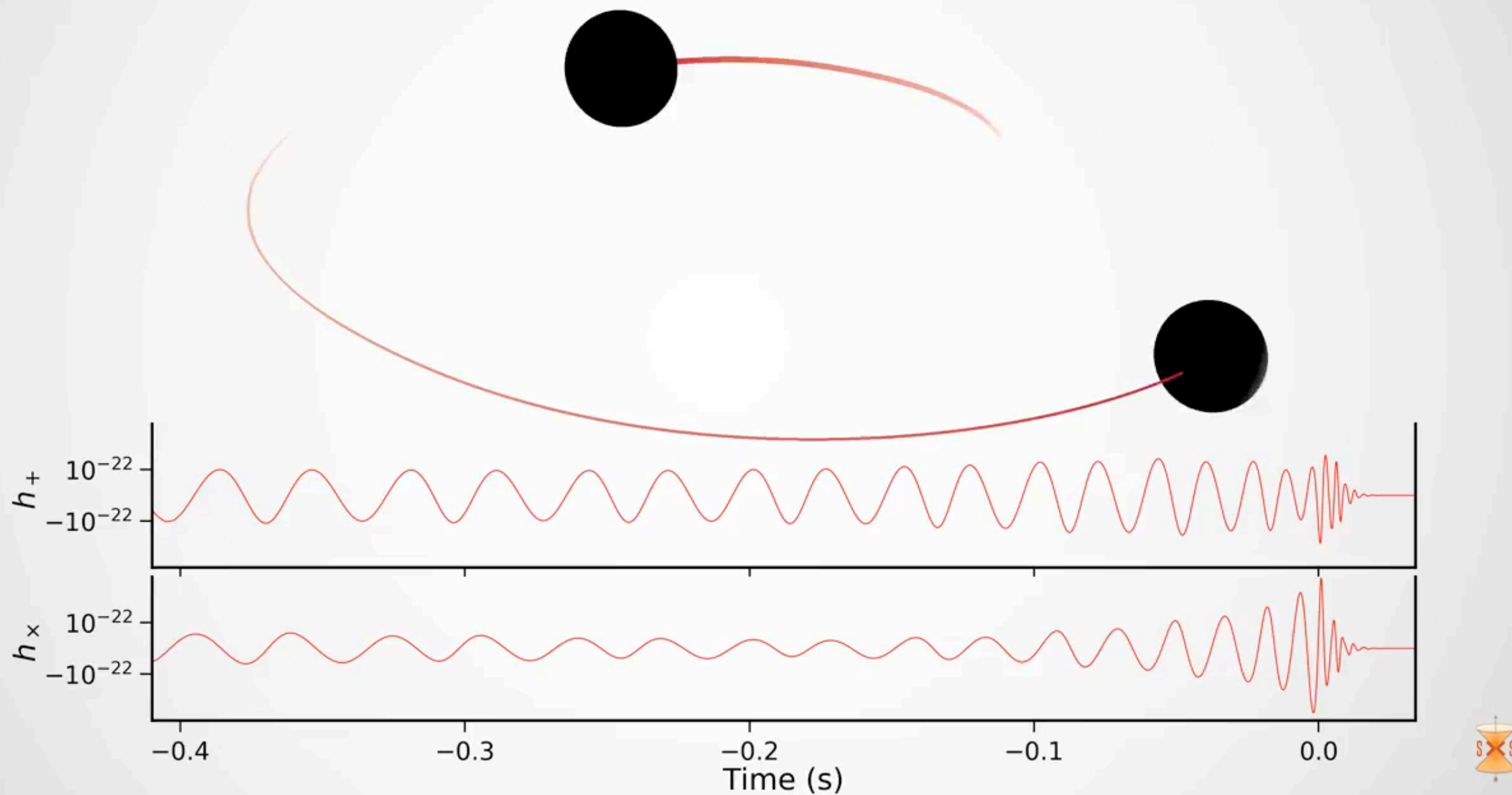


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先



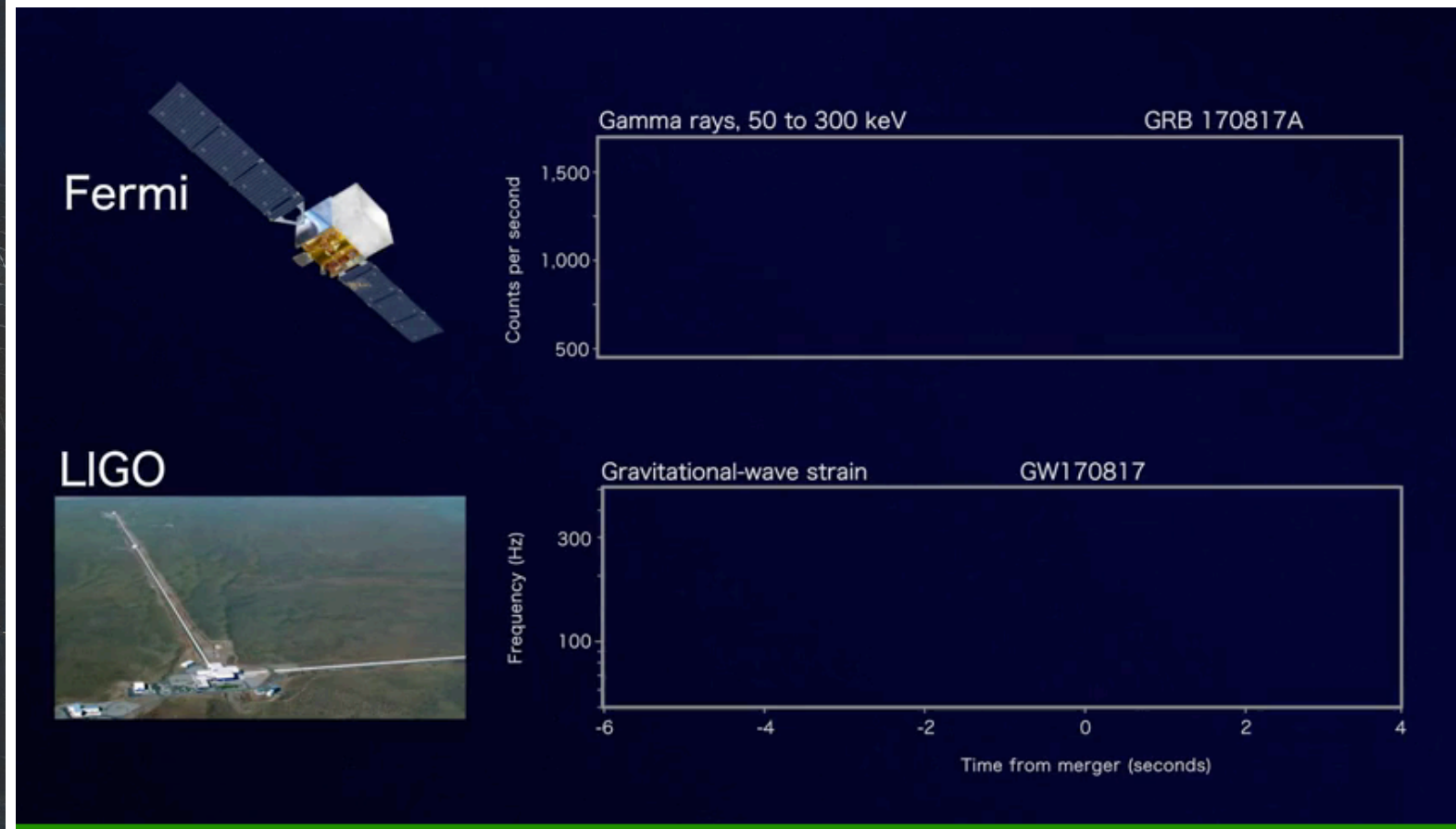
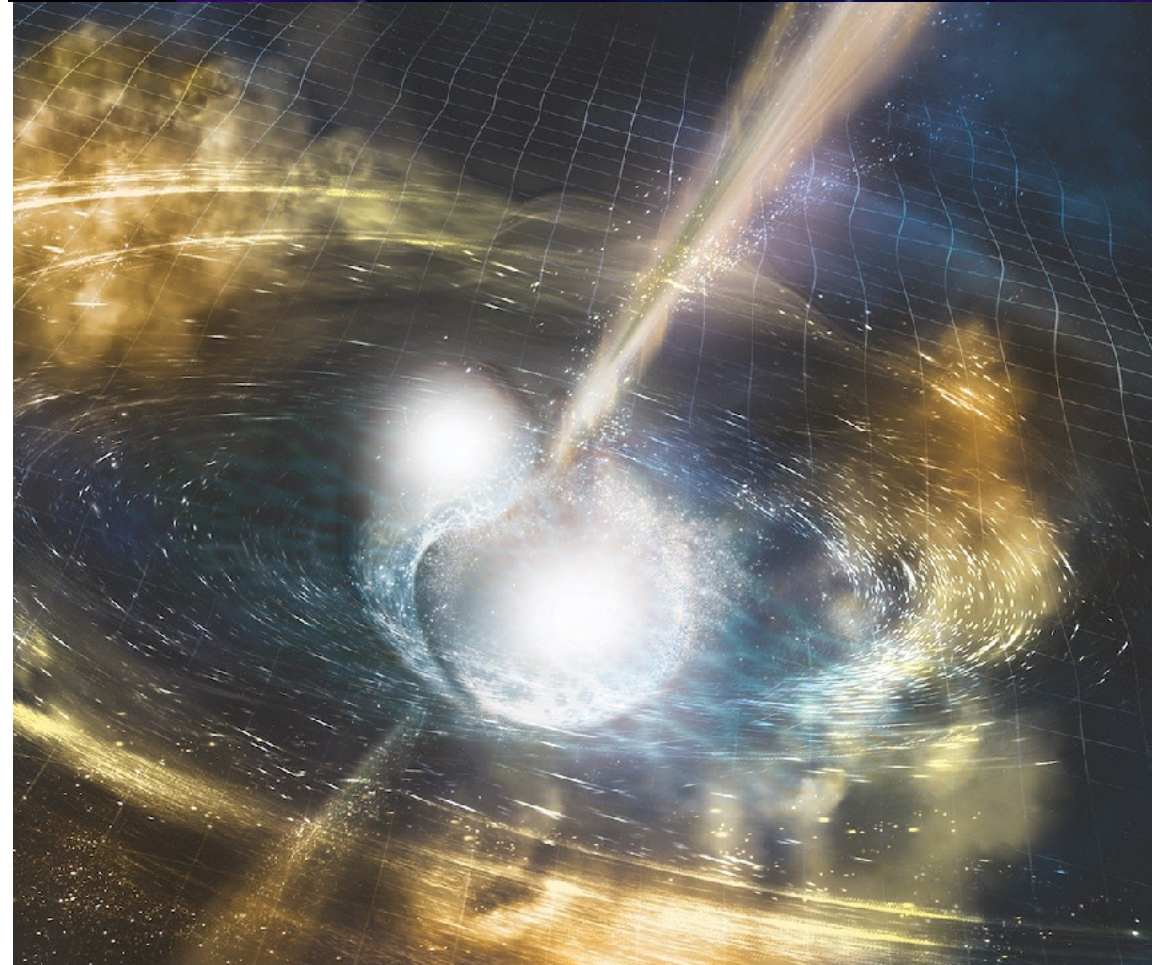
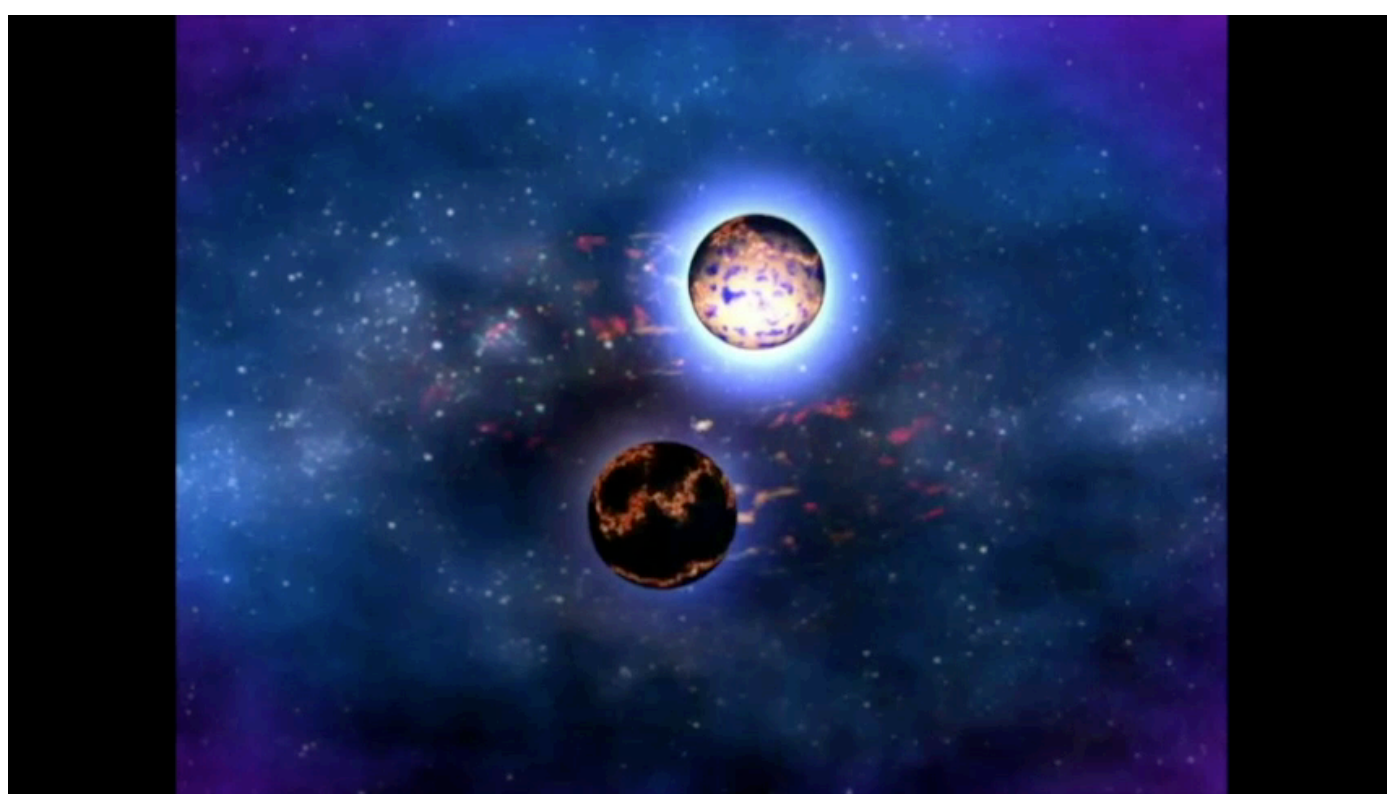
Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown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

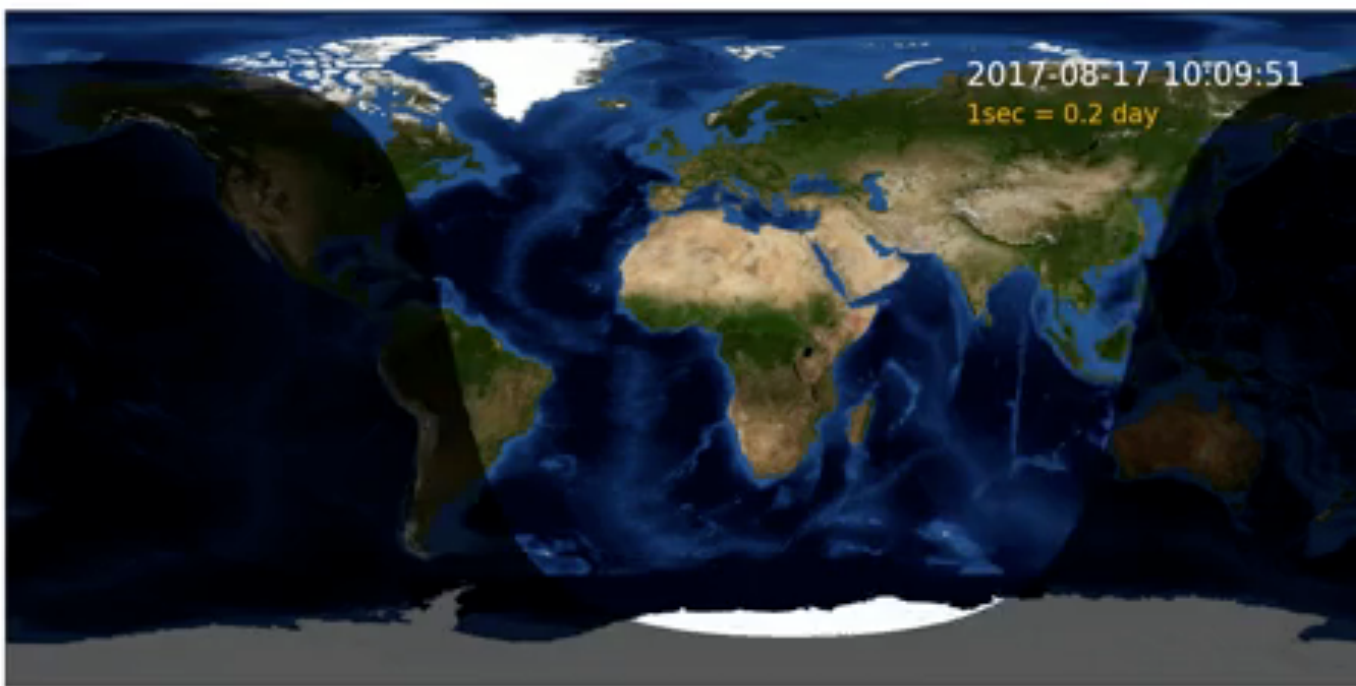
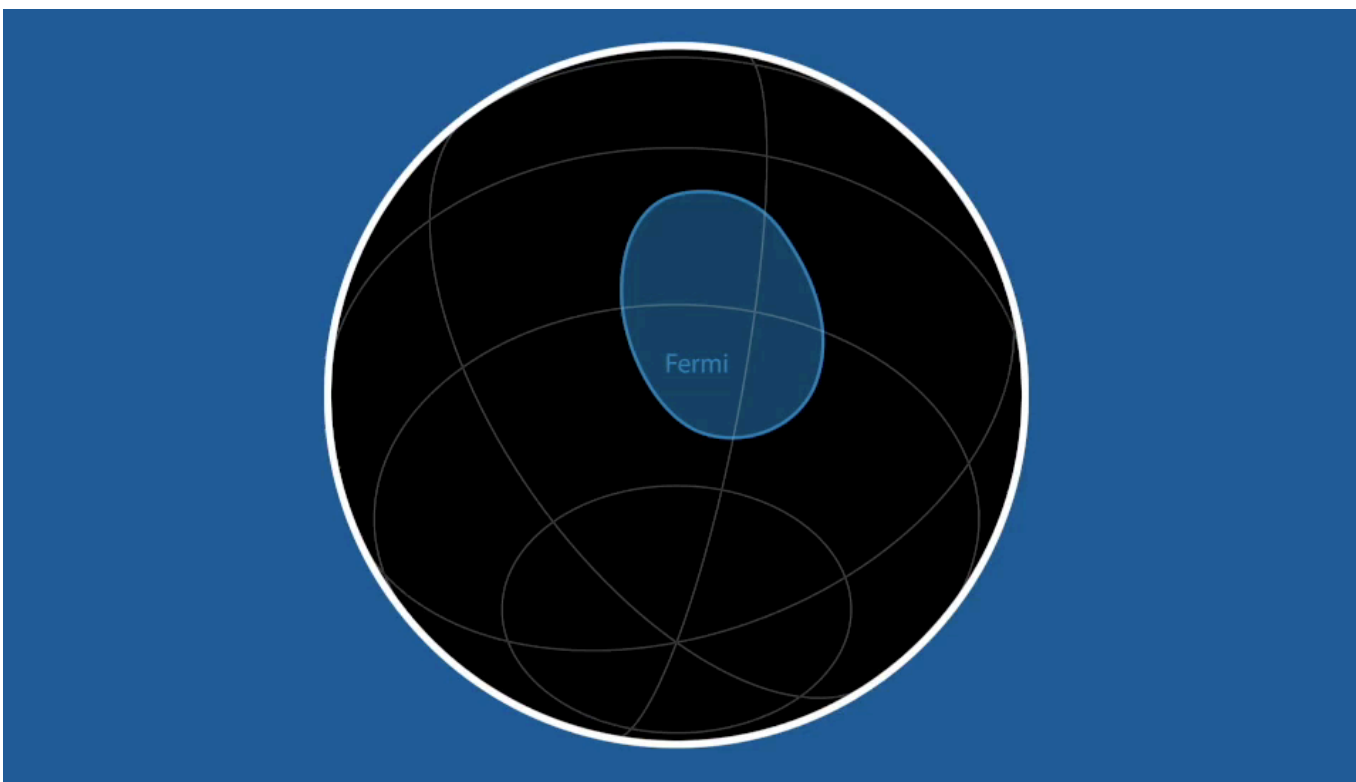
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



波源はNGC4993 (40Mpc先) !
1億3000万光年先

ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

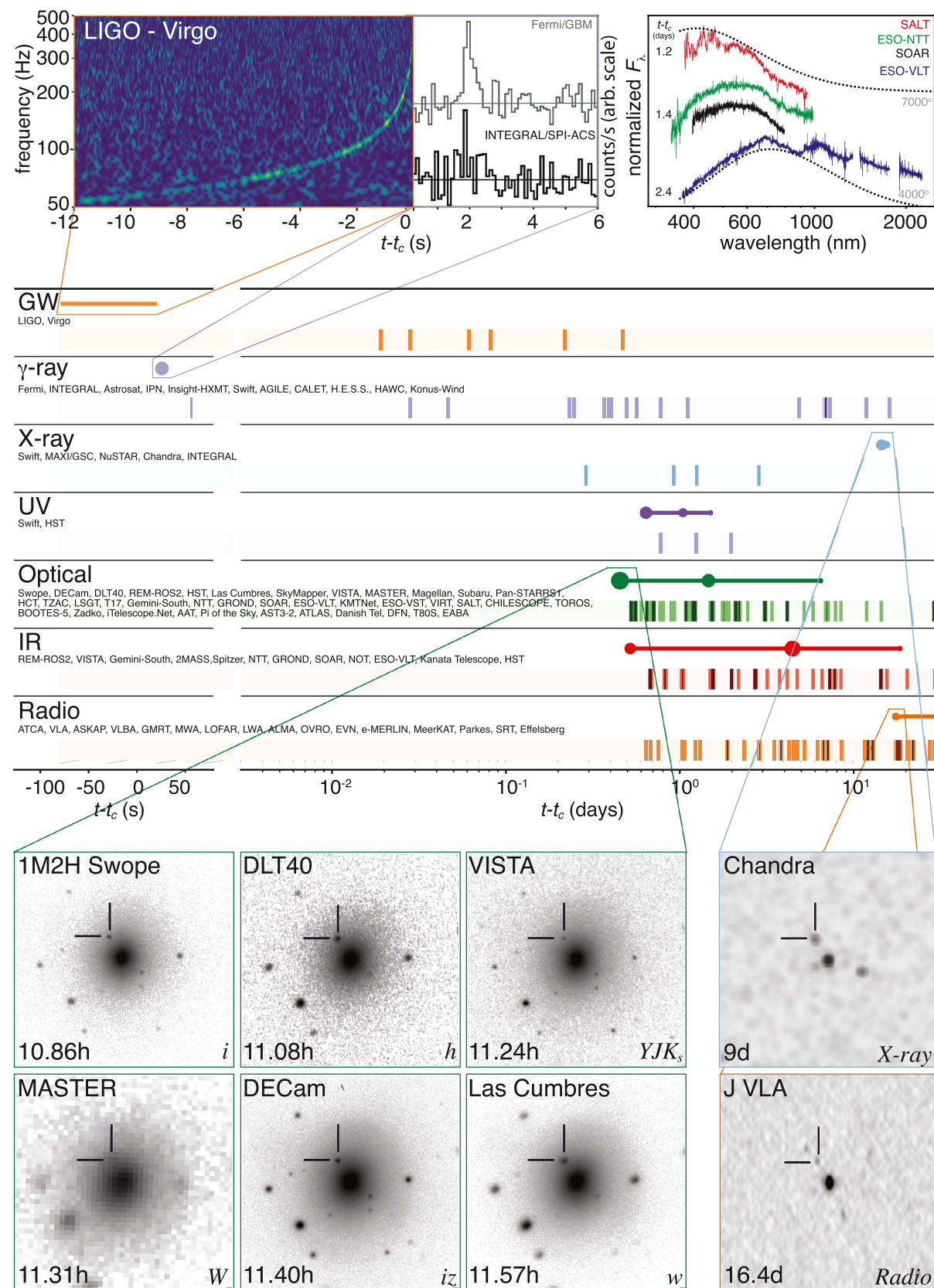
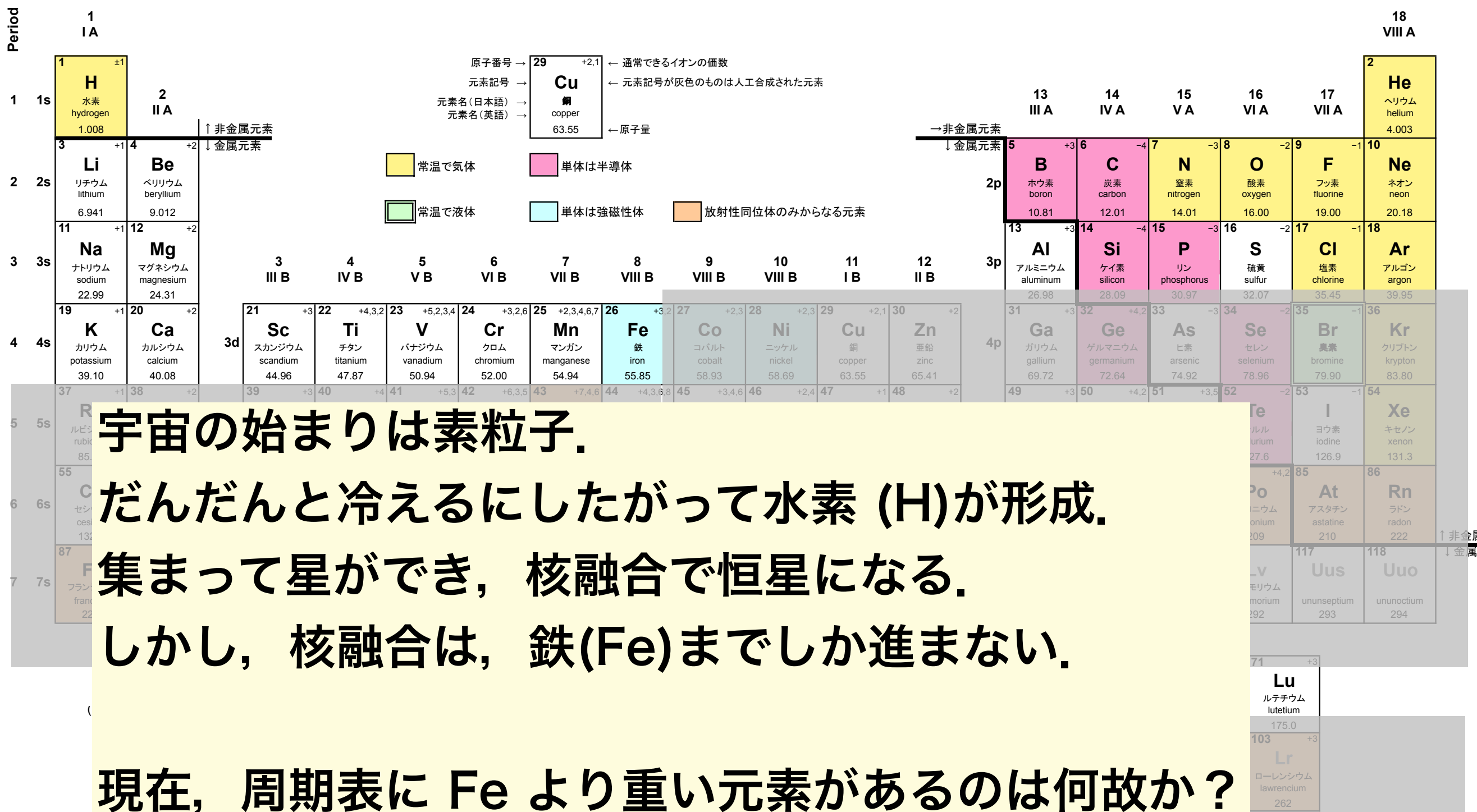


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band / messenger. First, the shaded dashes represent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



世界の重力波観測ネットワーク

4 km



4 km



600 m



3 km



KAGRA Hida
Japan

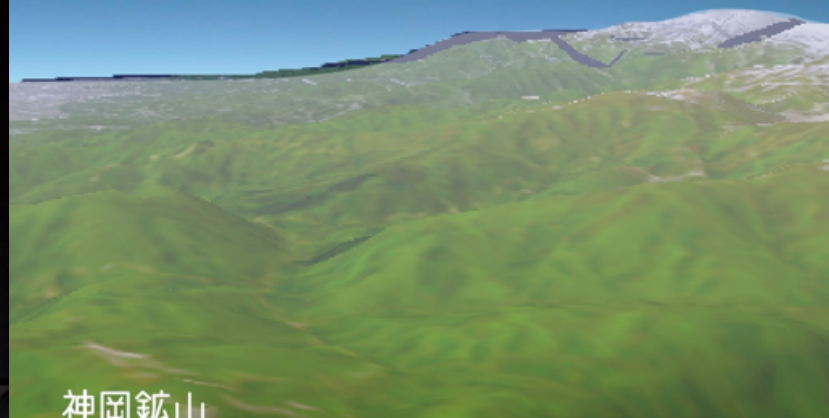


3 km

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector

大型低温重力波望遠鏡



神岡鉱山
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度 (20K) まで
冷却

熱雑音を小さくするため

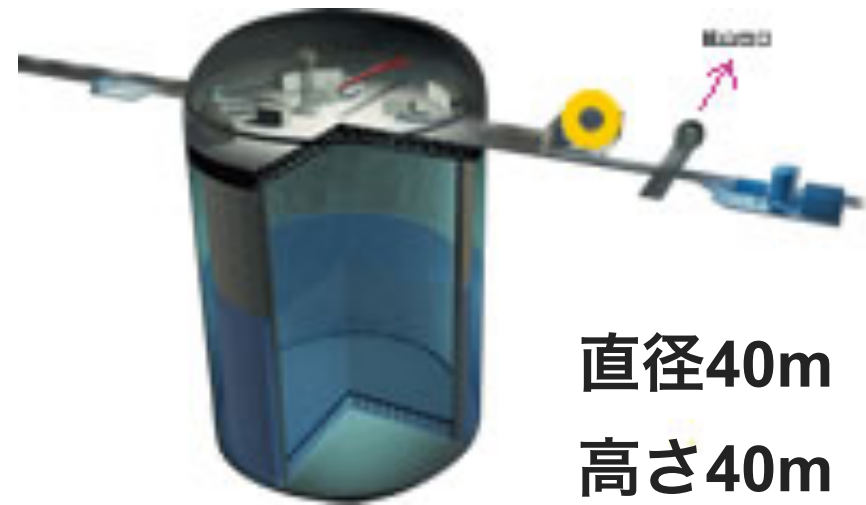
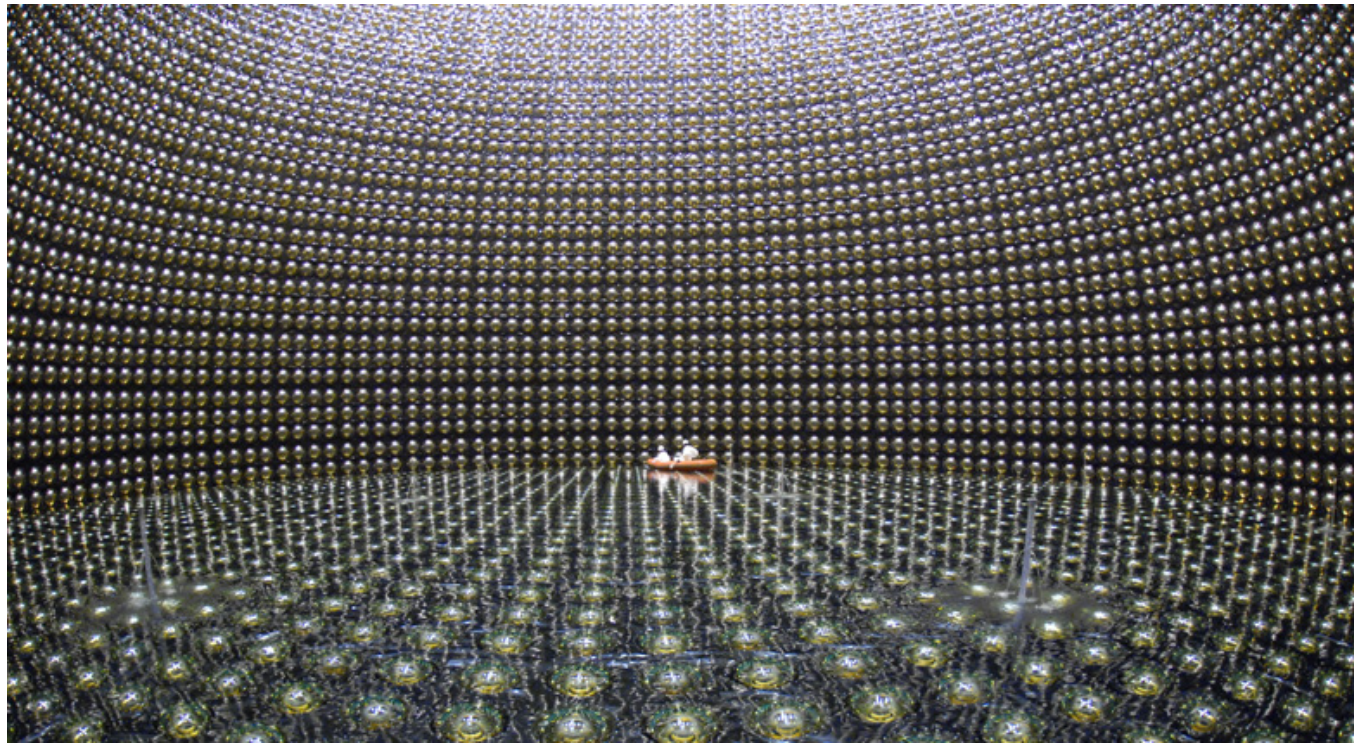
鏡の材質としてサファイア

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

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 (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） 干渉計の工夫

長い腕が欲しい. 750km位の長さ

▶ 300回往復させよう

強いレーザーが欲しい.

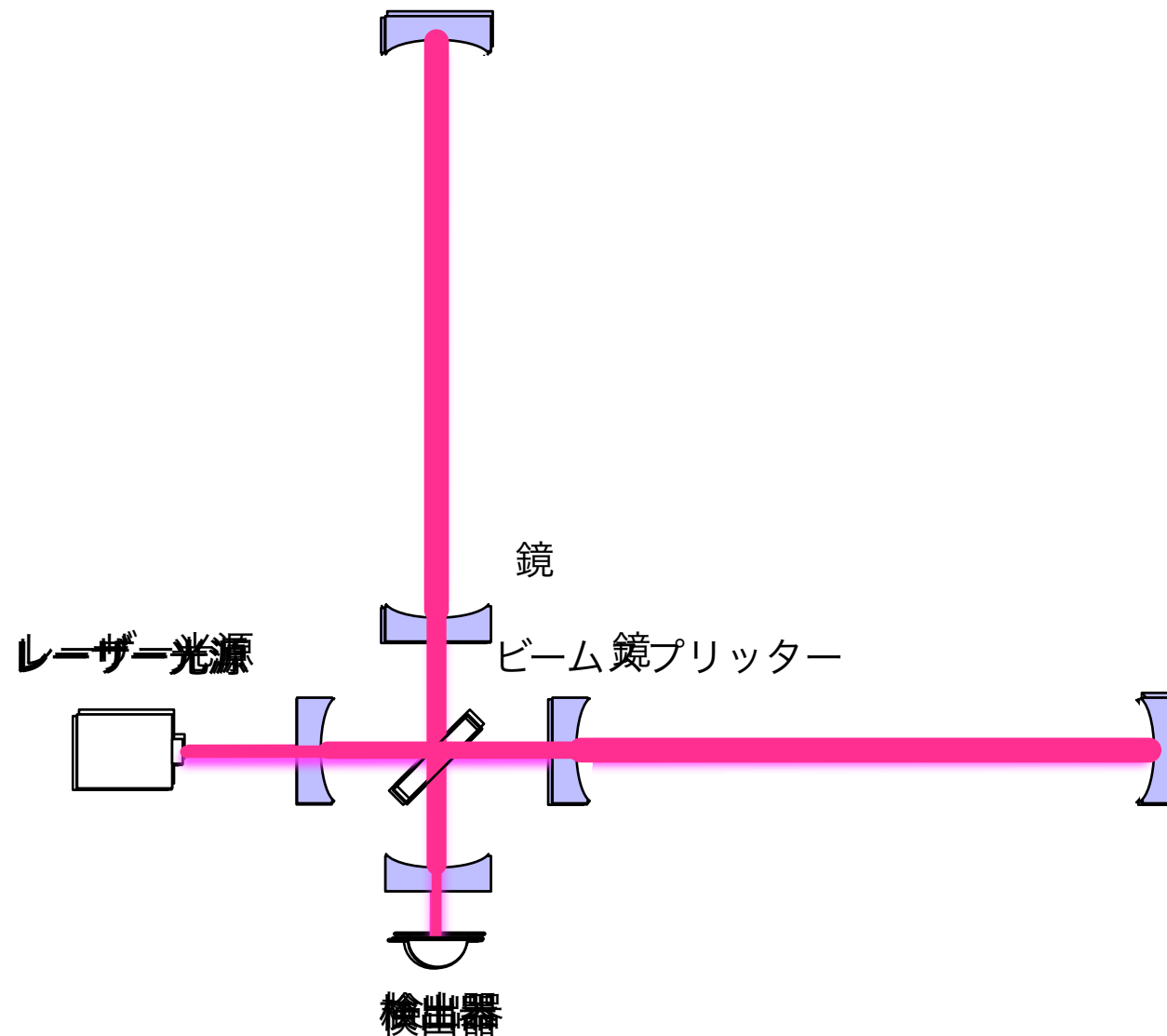
▶ 100回共鳴させよう

信号がまだ弱い

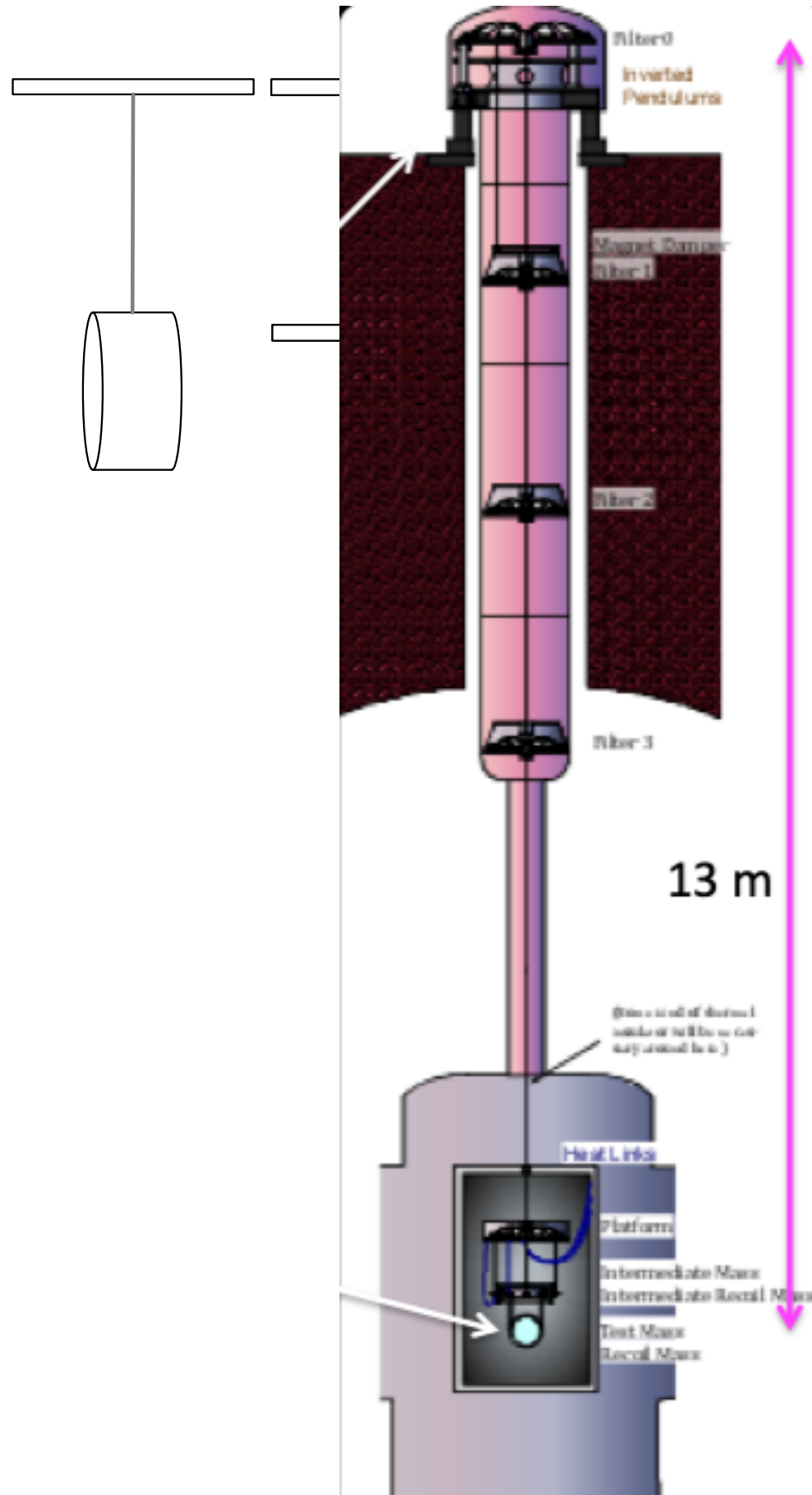
▶ 信号も共鳴させよう

レーザーがまだ弱い

▶ 強いレーザーを開発



KAGRA（かぐら：大型低温重力波望遠鏡） 干渉計の工夫



鏡が地面振動で揺れたら困る

▶ 吊り下げよう

高周波振動抑えたい

▶ 2段にしよう

▶ 3段にしよう

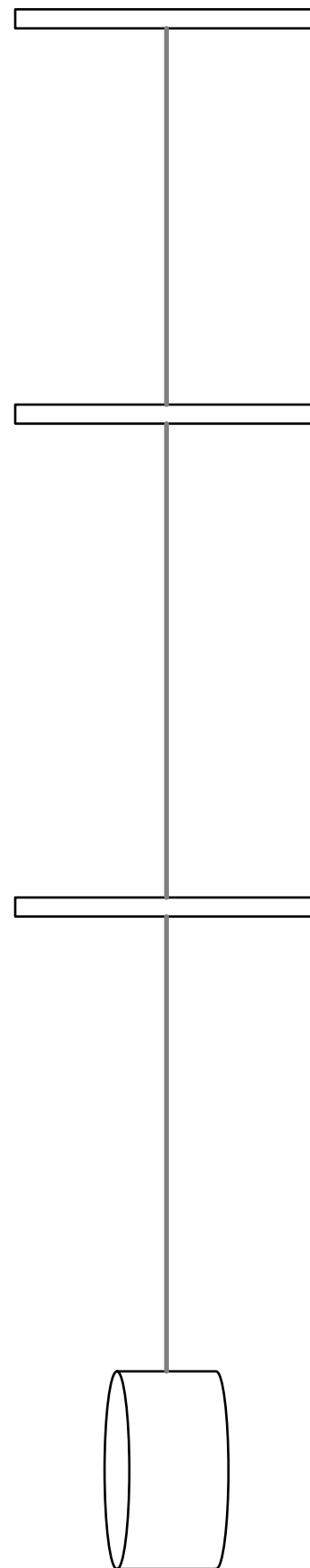
▶ 4段にしよう

低周波振動抑えたい

▶ ひもを長くしよう

高さ13.5m

トンネルの2層目から吊り下げる



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡) 干渉計の工夫



鏡が熱振動で揺れたら困る

▶ 温度を下げよう

20K (マイナス250度)

低温で耐えられる素材は？

▶ 人工サファイア

22.8 kg

diameter 22cm

thickness 15cm

低温にする装置は？

対流 x

放射 x

伝導 ○

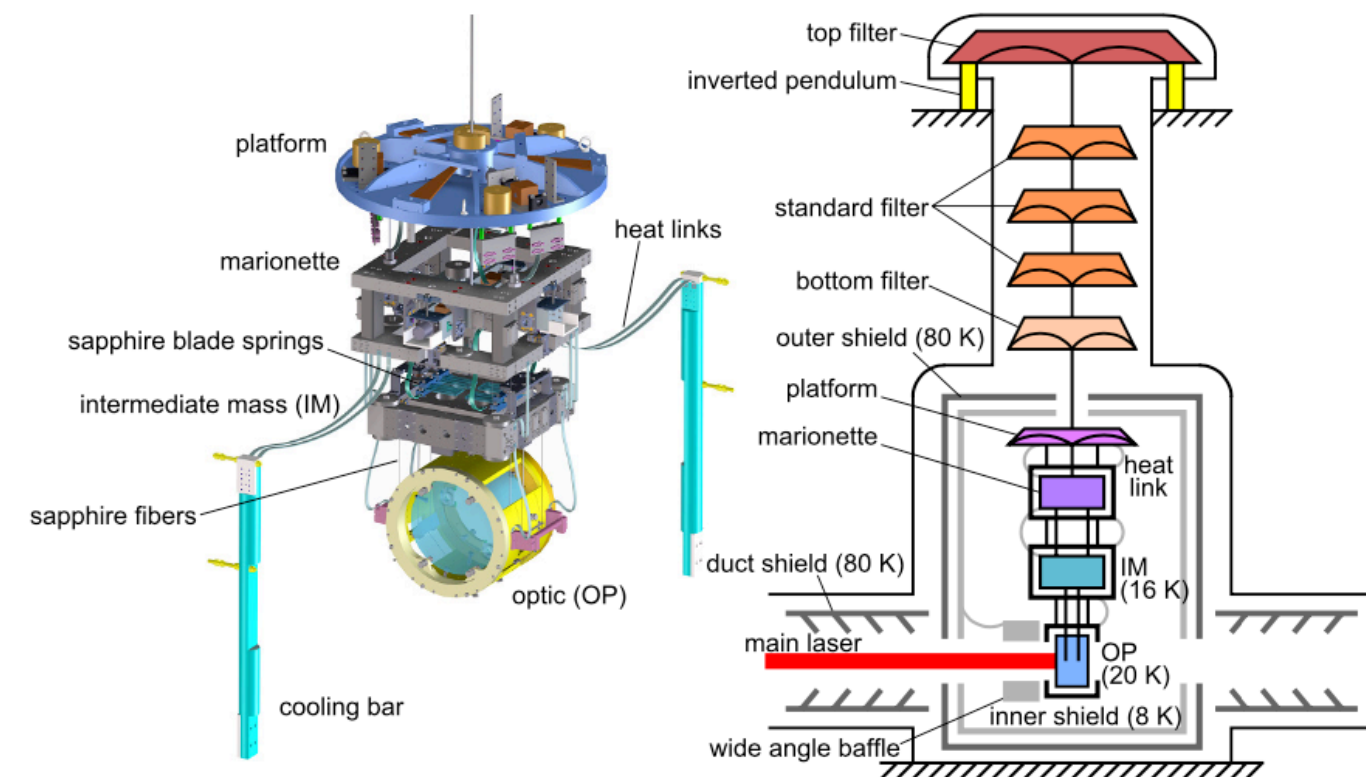
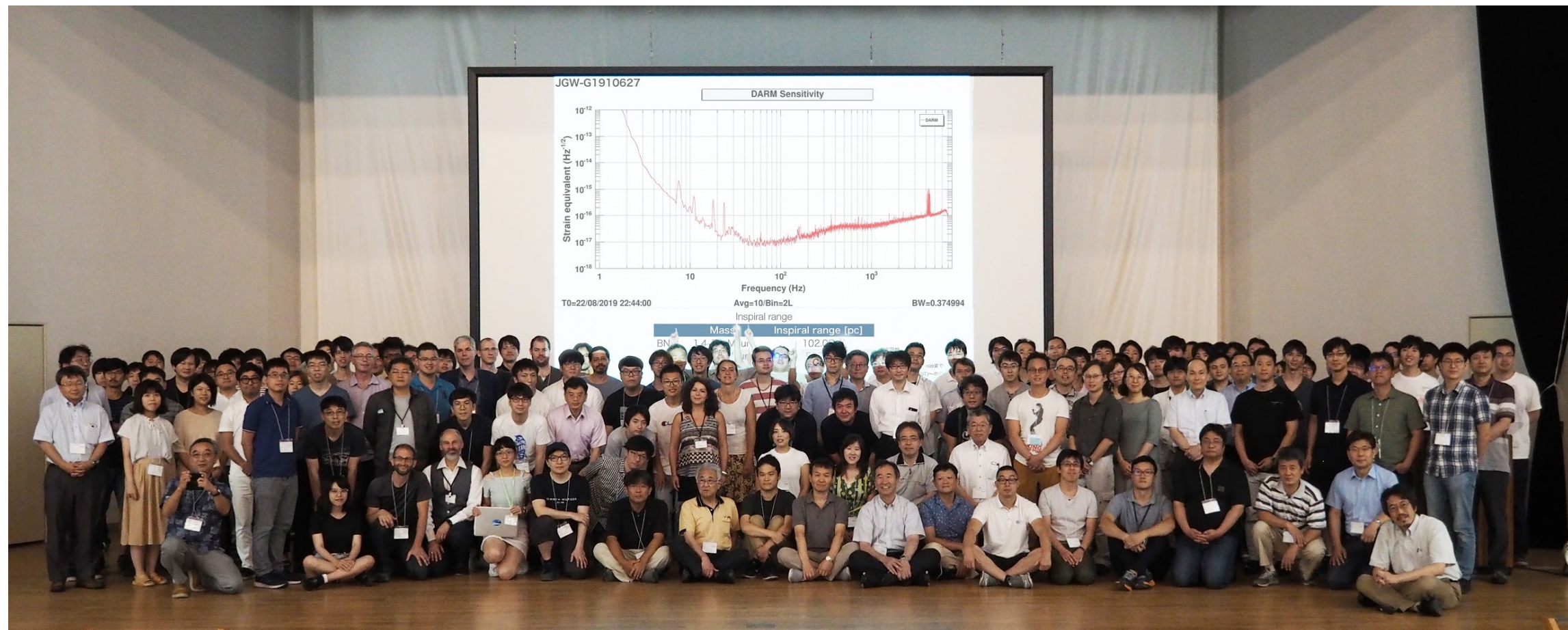


Figure 3. The CAD drawing of the cryogenic payload under Type-A (left) and the schematic of the cryogenic suspension system of sapphire test masses (right). Suspension stages outside of the outer shield are at room temperature.

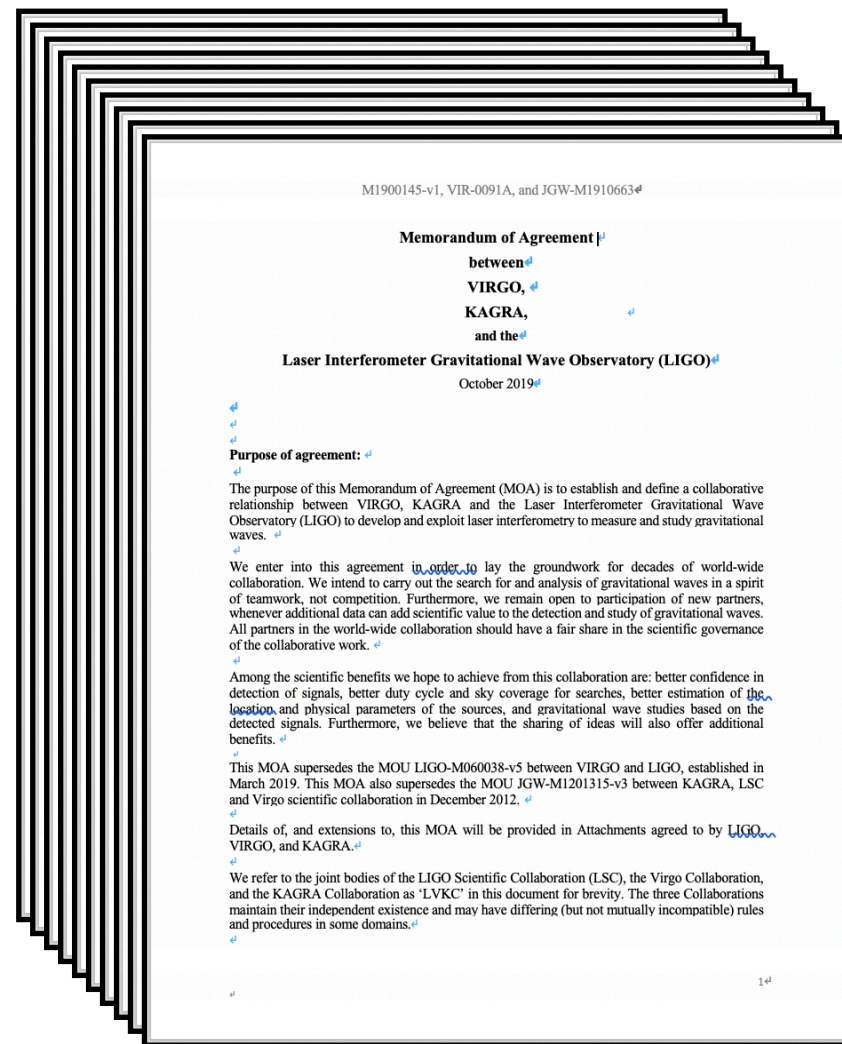
KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)



440 名の研究者
論文著者資格 200名
14 カ国・地域
110 グループ

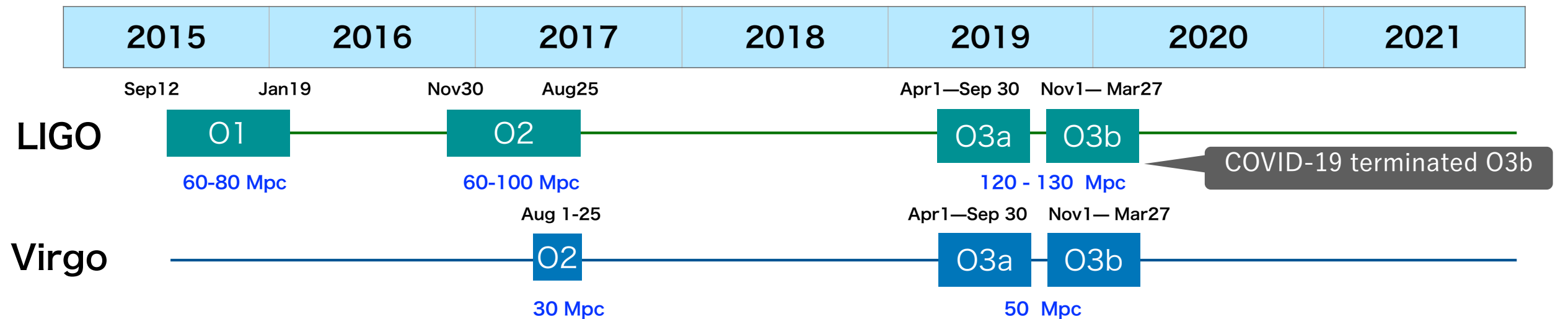


KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



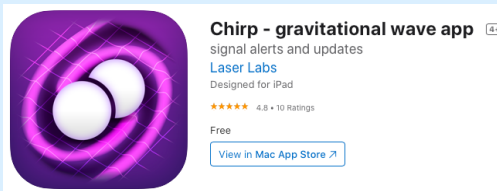
2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

Observation Period



Public Alert started from O3a

<https://gracedb.ligo.org>

<https://monitor.ligo.org/gwstatus>


GraceDB — Gravitational-Wave Candidate Event Database

HOME PUBLIC ALERTS SEARCH LATEST DOCUMENTATION LOGIN

Latest — as of 19 August 2019 22:13:41 UTC

Test and MDC events and superevents are not included in the search results by default; see the [query help](#) for information on how to search for events and superevents in those categories.

Query:

Search for: ☐ Superevent ☐

Search

UID	Labels	t_start	t_0	t_end	FAR (Hz)	UTC	Created
S190816i	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1249995888.757789	1249995889.757789	1249995890.757789	1.436e-08	2019-08-16 13:05:12 UTC	
S190814bv	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1249852255.996787	1249852257.012957	1249852258.021731	2.033e-33	2019-08-14 21:11:18 UTC	
S190808ae	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1249338098.496141	1249338099.496141	1249338100.496141	3.366e-08	2019-08-08 22:21:45 UTC	
S190728a	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1248331527.497344	1248331528.546797	1248331529.706055	2.527e-21	2019-07-28 06:45:27 UTC	
S190727b	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1248242630.976288	1248242631.985888				
S190720a	PE_READY ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1247616533.703127	1247616534.704102				
S190718y	ADVOK SKYMAP_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY DQOK GCN_PRELIM_SENT	1247495729.067865	1247495730.067865				

KAGRA

joined Oct 2019

Apr7-21



1 Mpc

LVK analysis papers started from O3b scientific results.

➔ 50 events in total

GWTC-2

2020/10/28

➔ 55 total

GWTC-2.1

2021/8/2

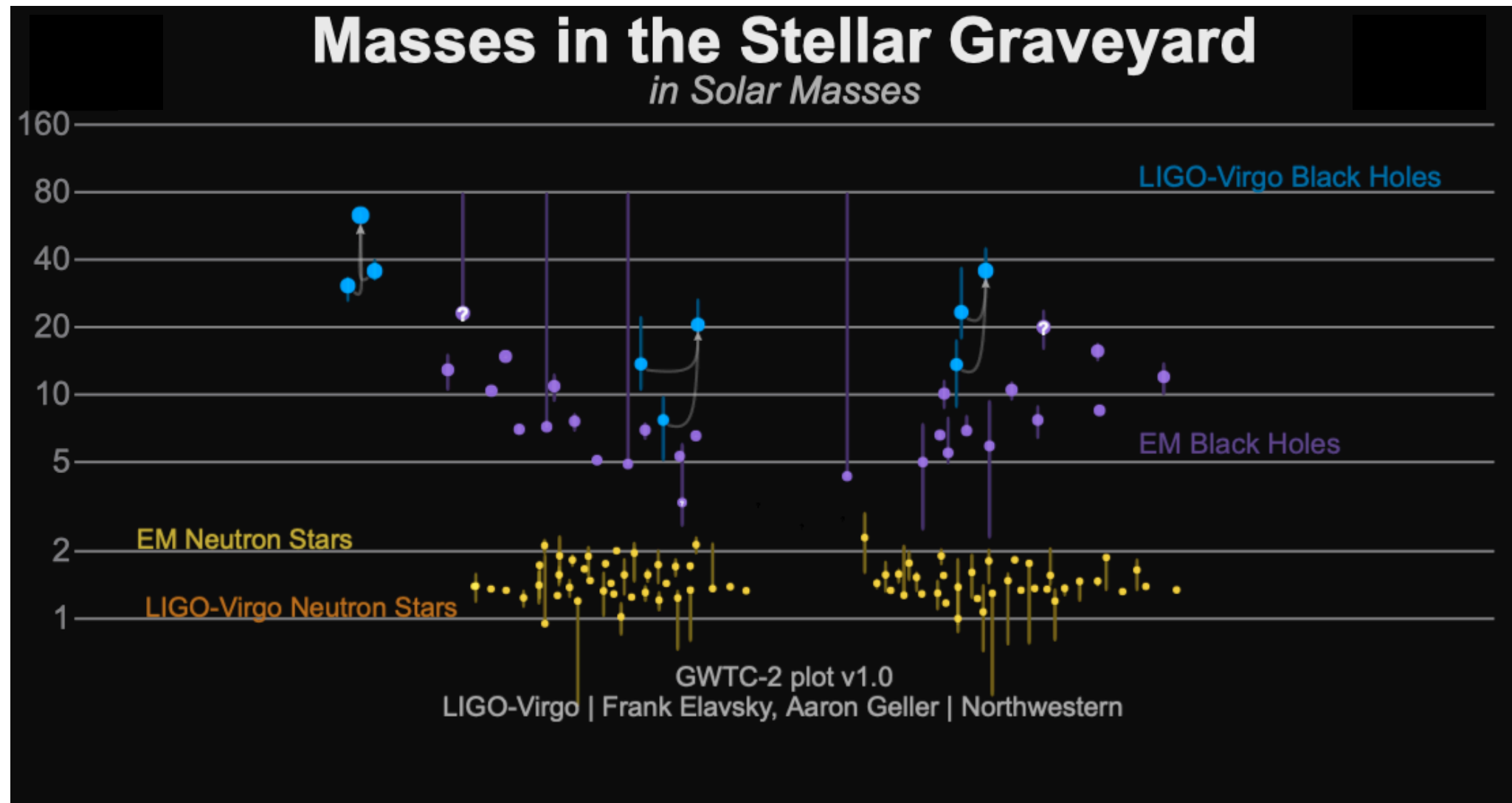
➔ 90 total

GWTC-3

2021/11/5



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

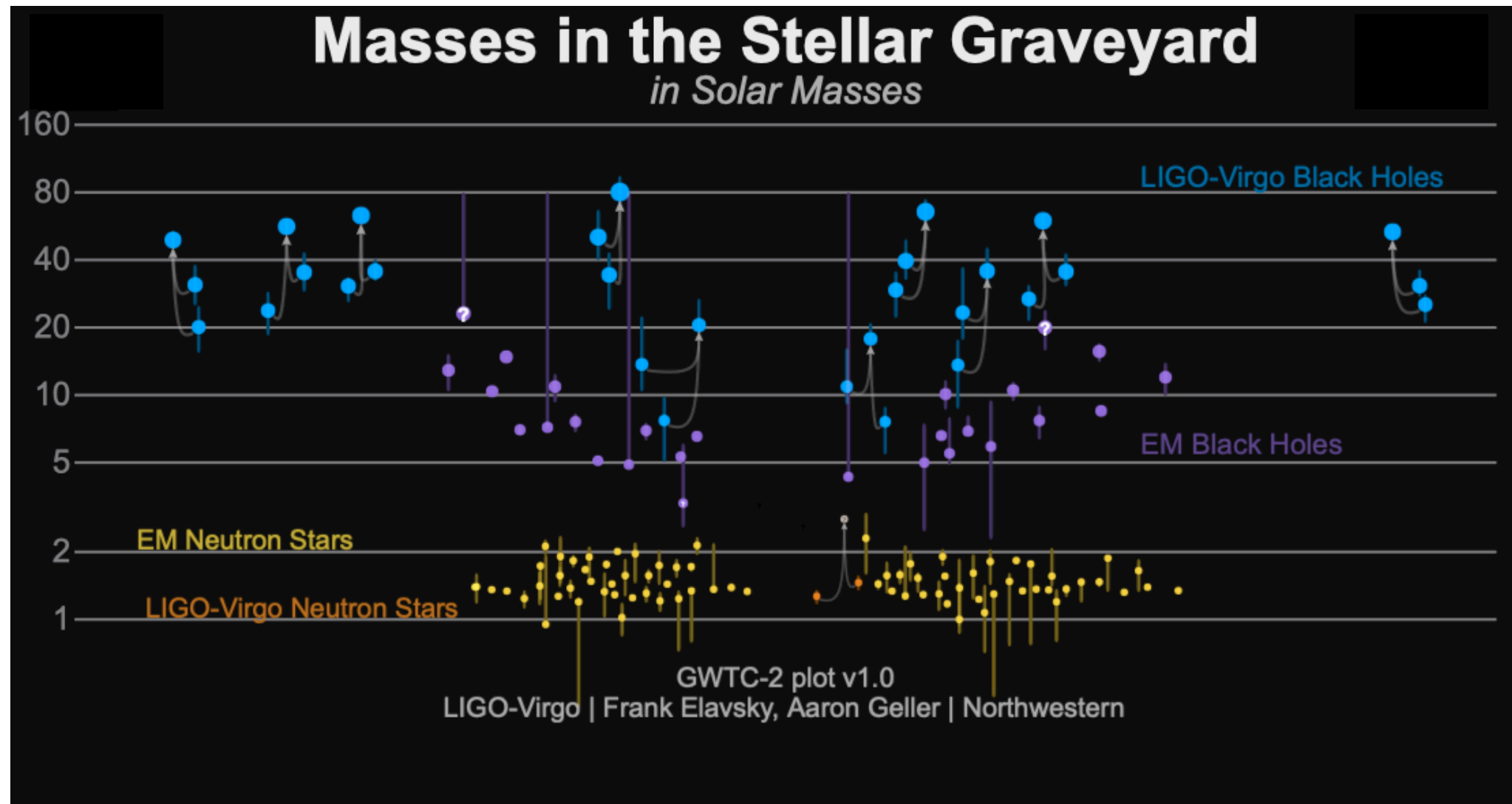


3 BHBH

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>

O2 (2016/11/30 - 2017/8/25)

After O2 : **GWTC1** (2018/12/3 released)

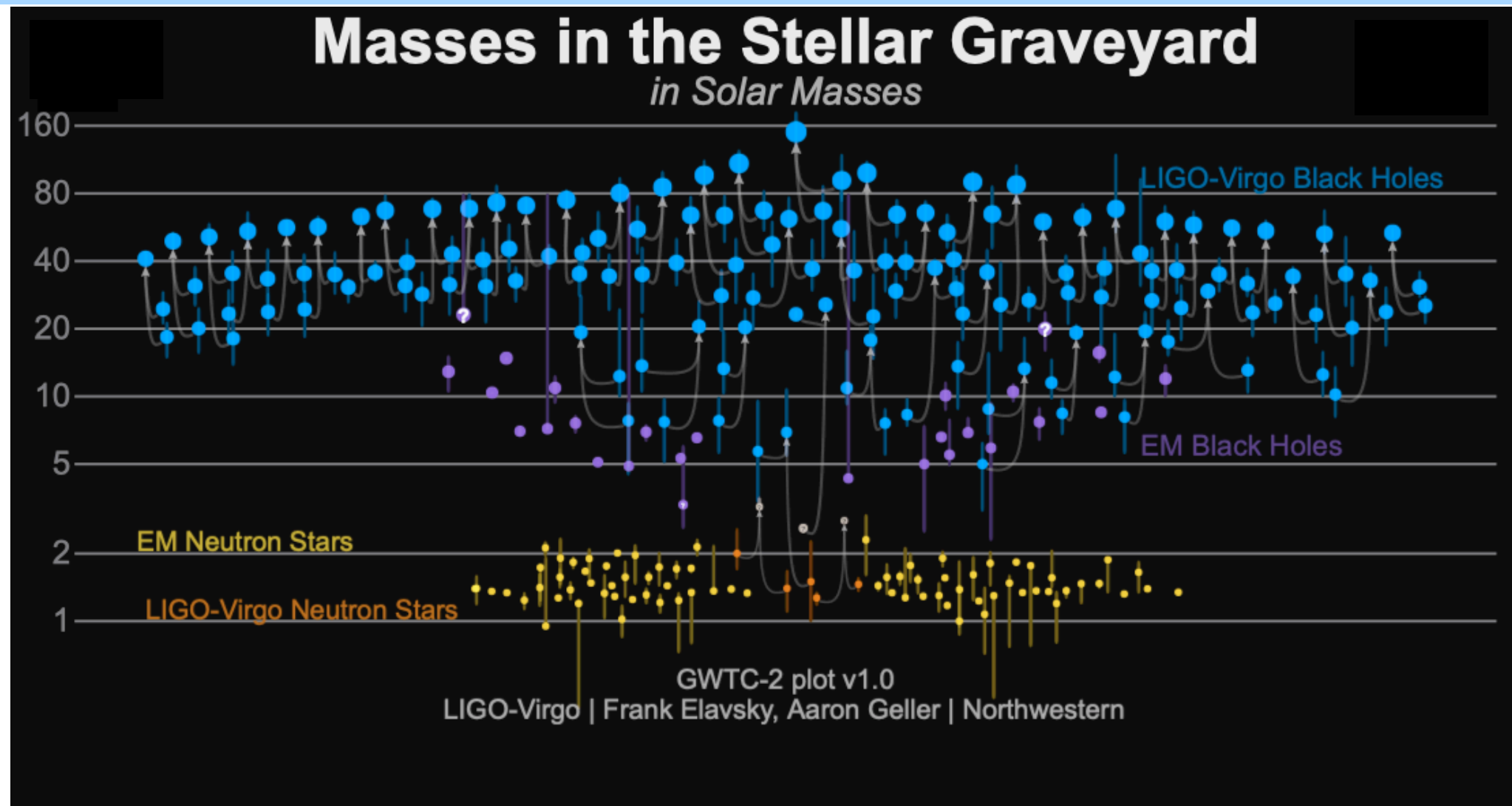
10 BHBH
1 NSNS

- **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>

O3a (2019/4/1 - 2019/9/30)

After O3a : **GWTC2** (2020/10/28 released)

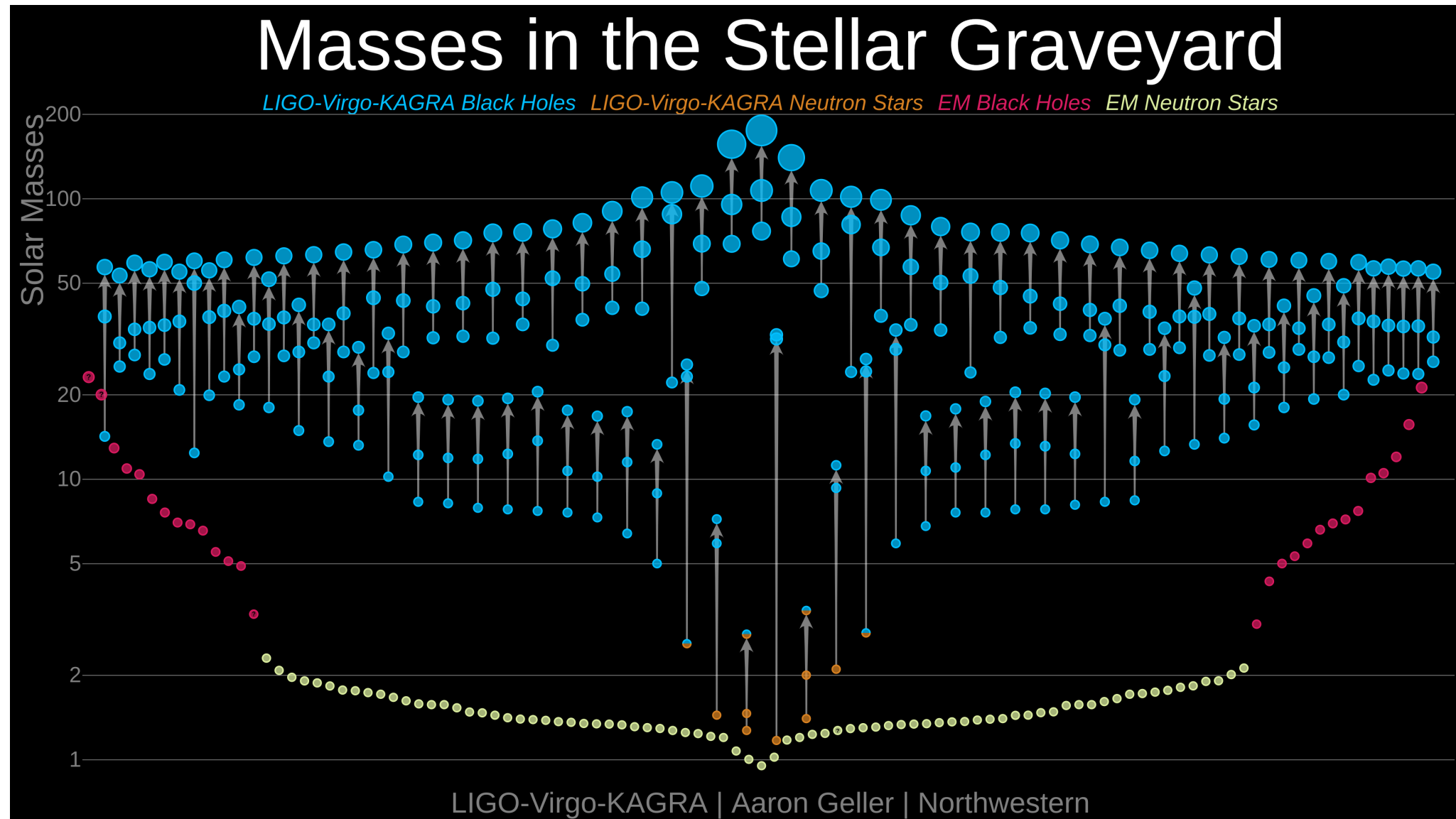


46 BHBH
2 NSNS
2 BH+?

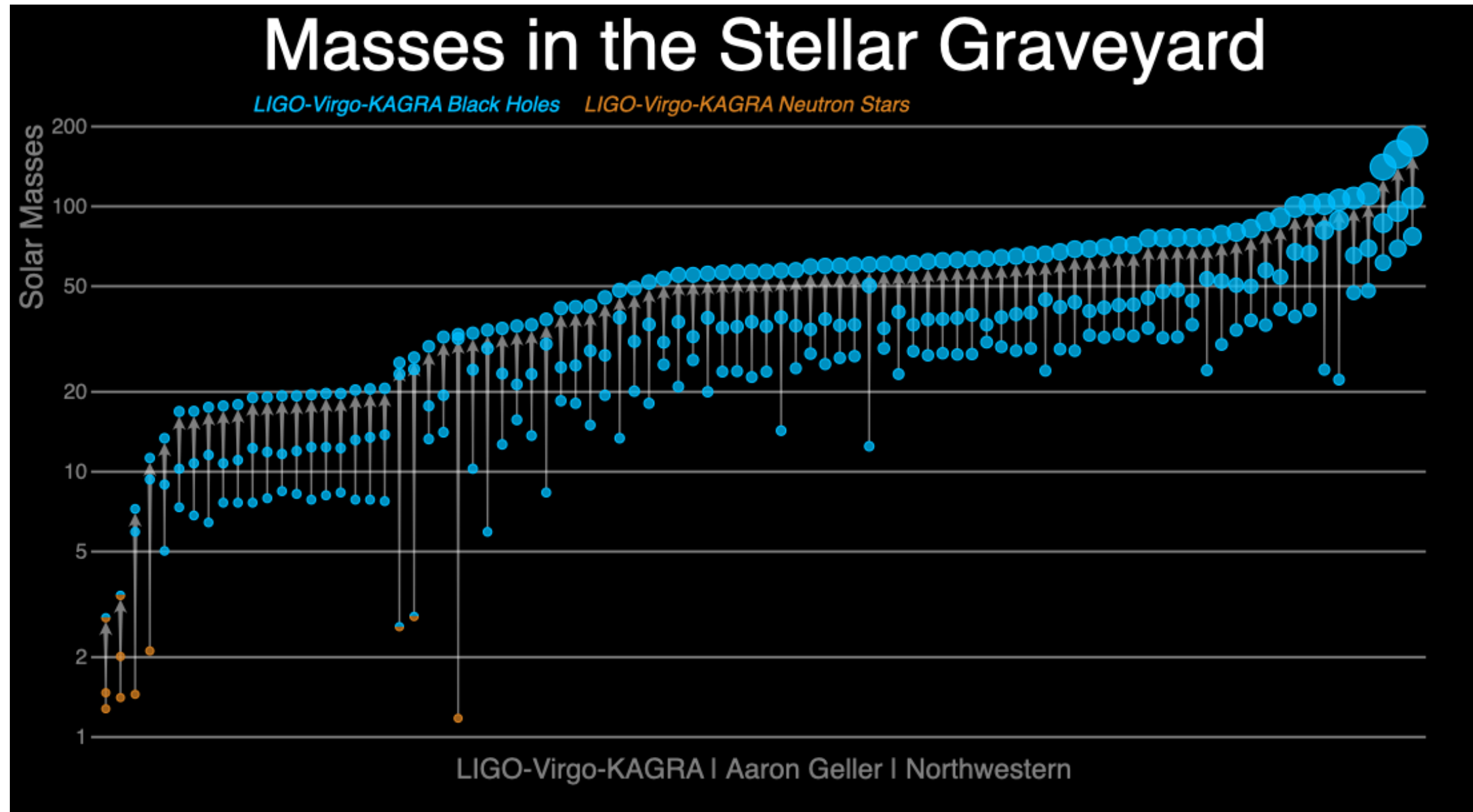
- [GW190412](#): the first BBH with definitively asymmetric component masses, which also shows evidence for [higher harmonics](#)
- [GW190425](#): the second gravitational-wave event consistent with a BNS, following [GW170817](#)
- [GW190426_152155](#): a low-mass event consistent with either an NSBH 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

December 8, 2021

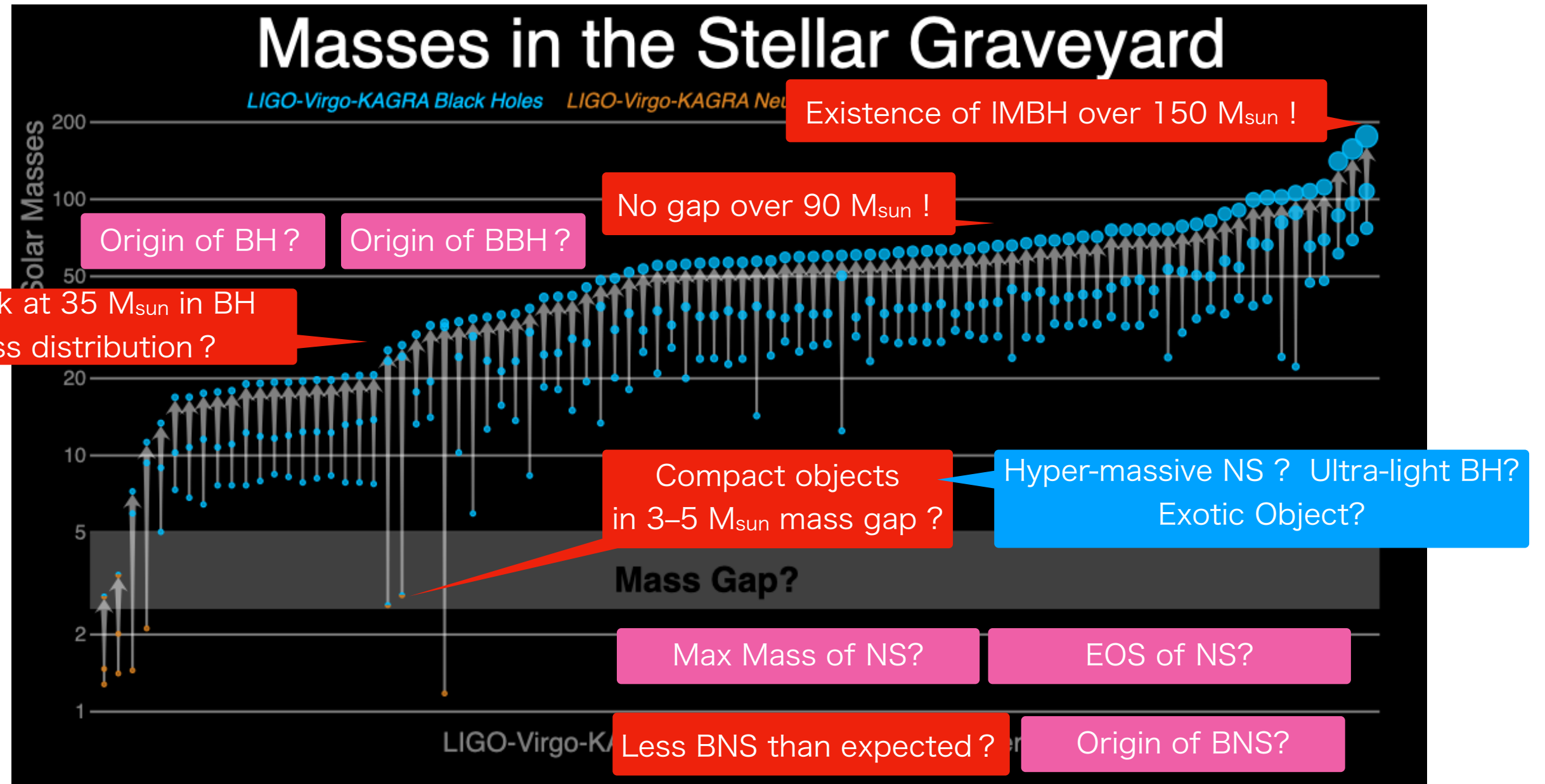
O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b : **GWTC-3** (2021/11/7 released)
<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

GWTC-3



GWTC-3



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			

ガンマ線

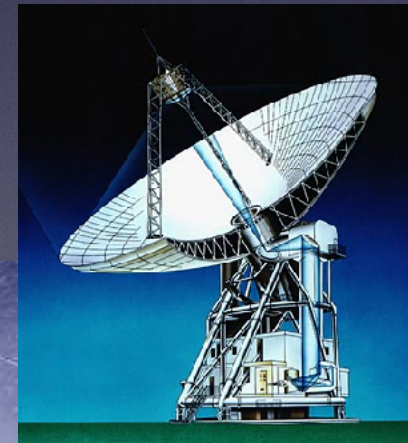
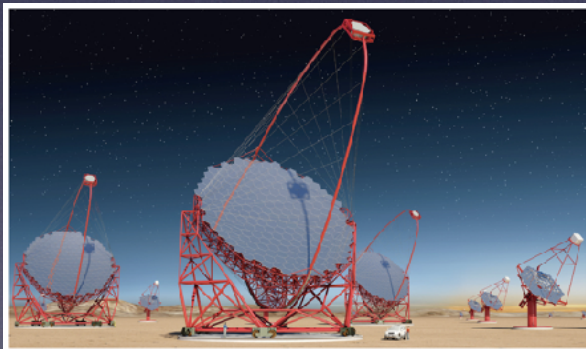
X線

可視光

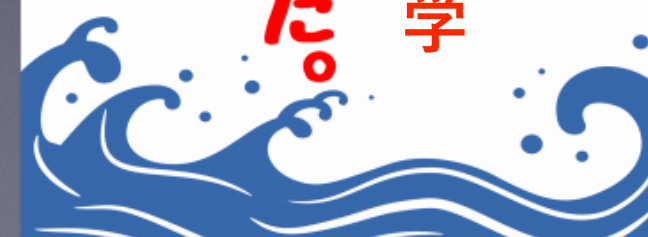
赤外

電波

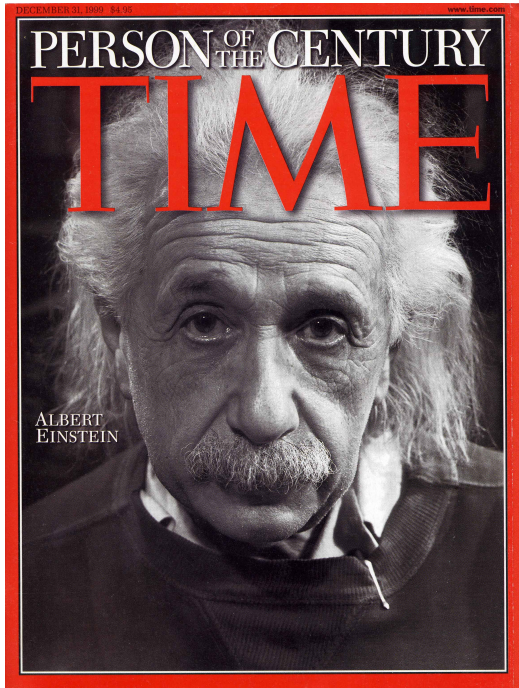
重力波



重力波天文学
は
じ
め
ま
し
た。



100歳を超えた相対性理論



Time
1999/12/31

1. 2つの相対性理論
2. ブラックホールの観測
3. 重力波の検出
4. 時計を使った相対性理論の検証



GPS (Global Positioning System)

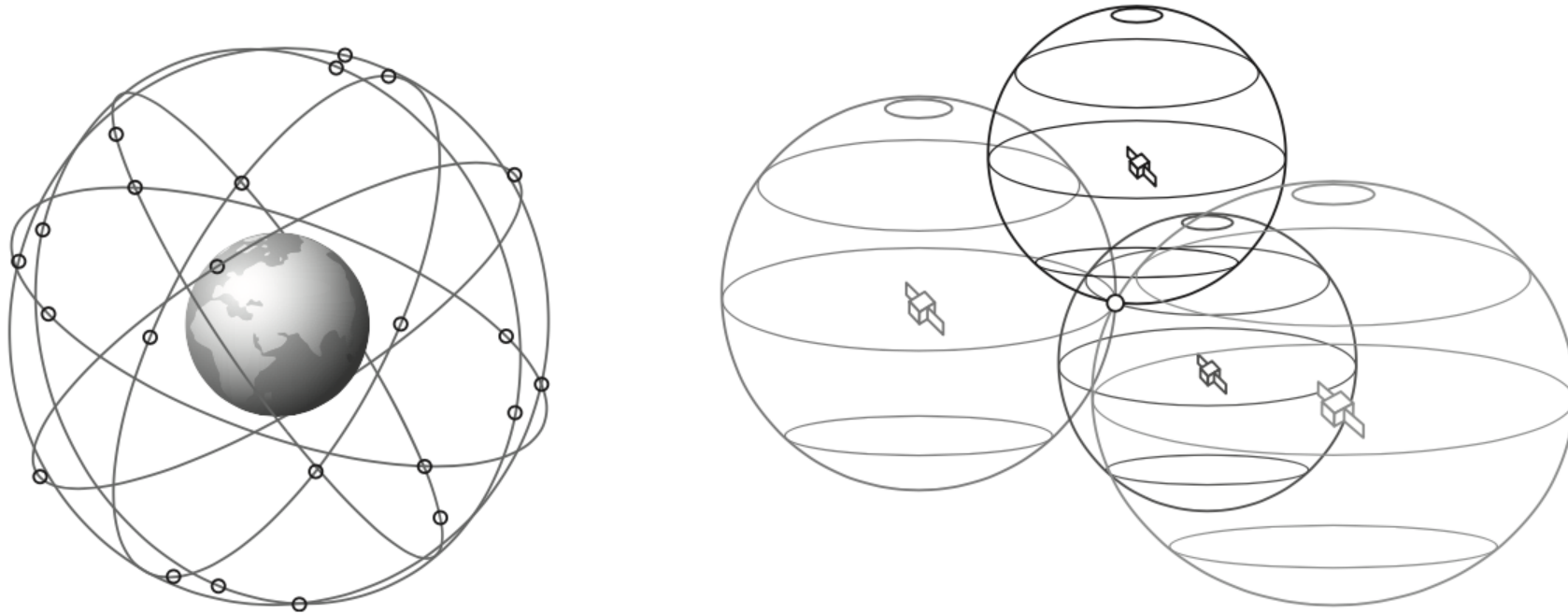


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



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

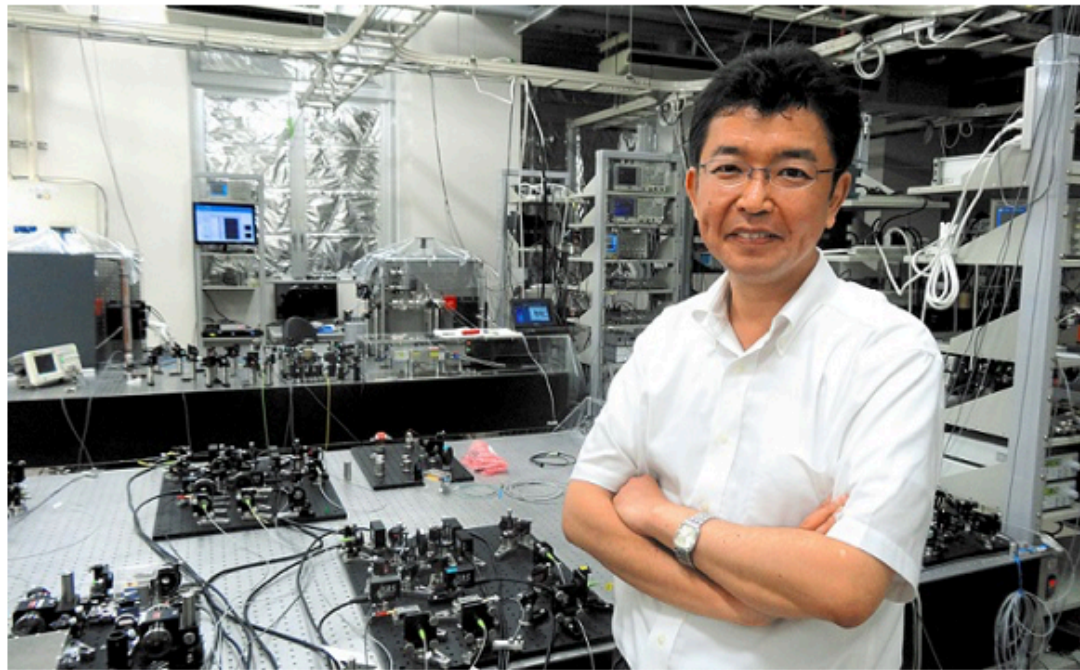
⇒ 1 日につき, 38×10^{-6} 秒ずつ衛星の時計を遅らせる必要あり

⇒ この補正をしないと, 1 日につき, 11.5 km 狂ってしまう

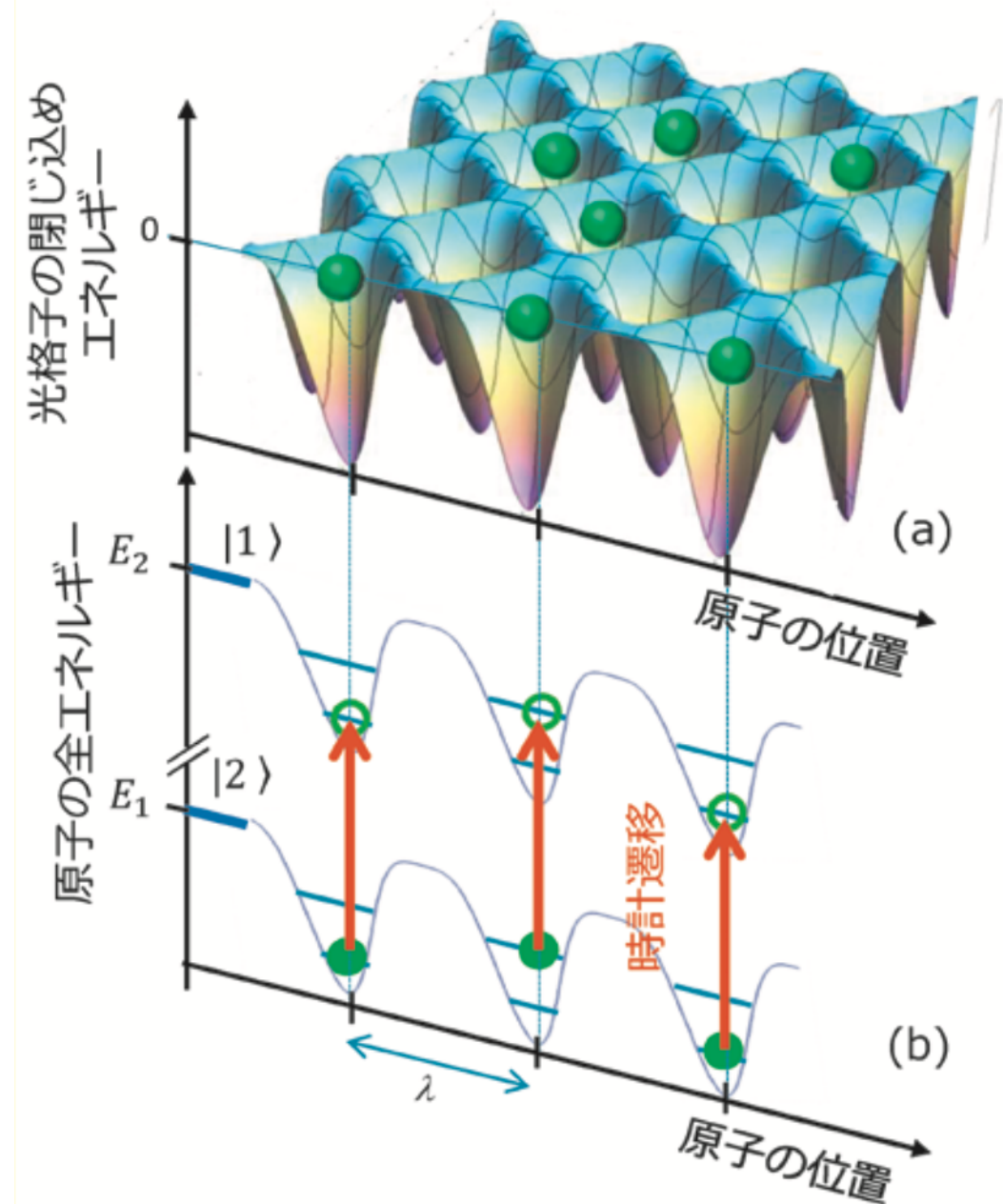
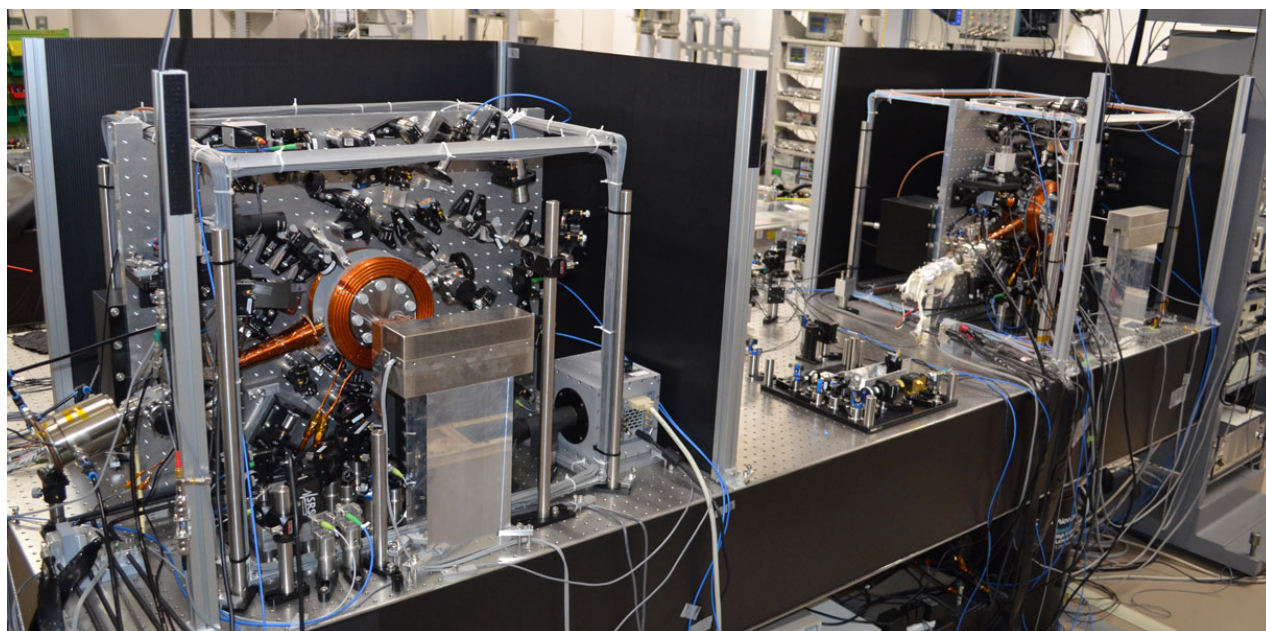


時間を測る

もっとも精密な時計＝光格子時計



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



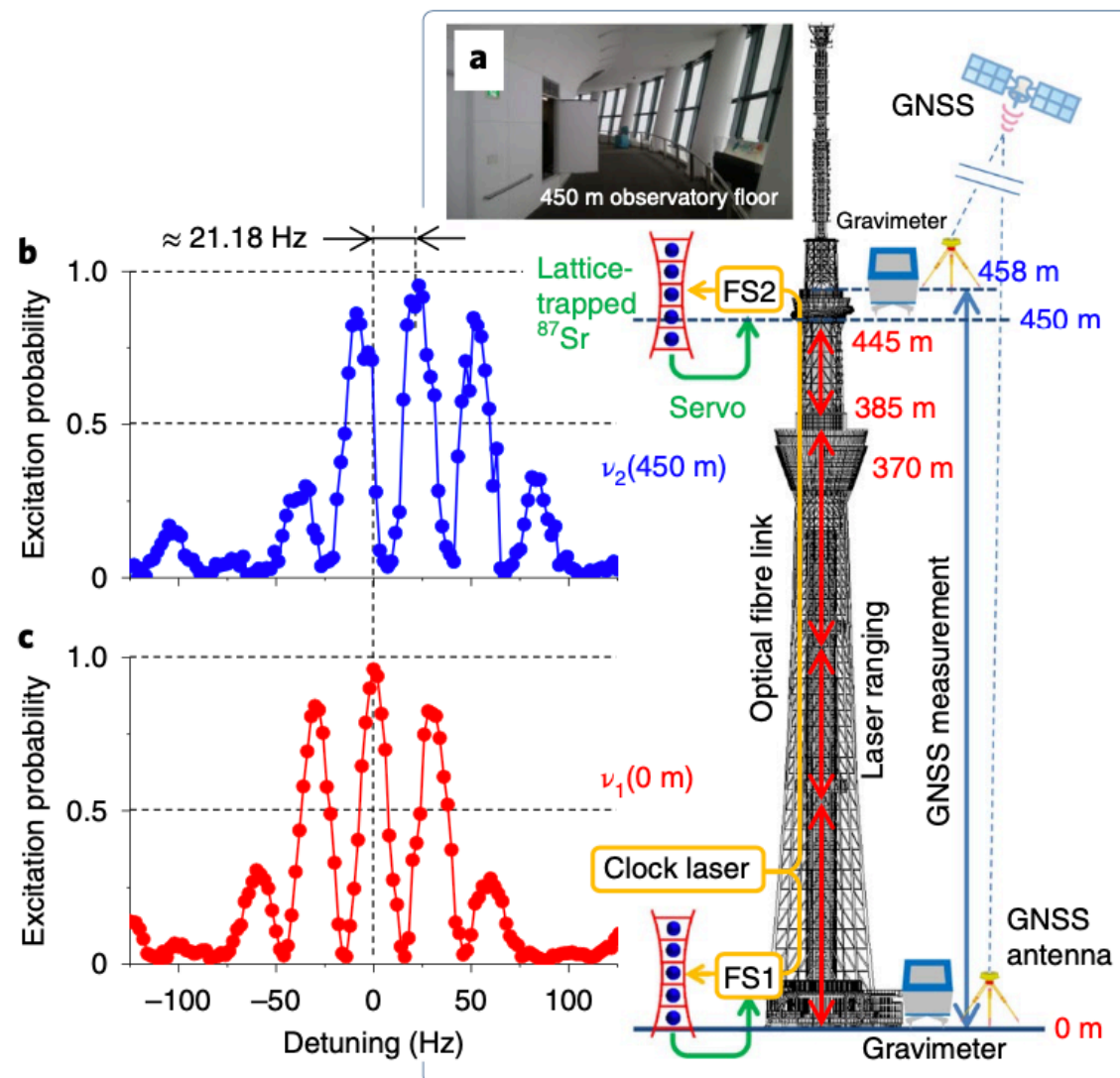
10^{-18} の精度を実現
(300億年ですれは1秒以内)

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。



Nature Photonics, 14 (2020) 411

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^{1,2}, Ichiro Ushijima³, Noriaki Ohmae^{1,2}, Toshihiro Yahagi⁴, Kensuke Kokado⁴, Hisaaki Shinkai⁵ and Hidetoshi Katori^{1,2,3}✉

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

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

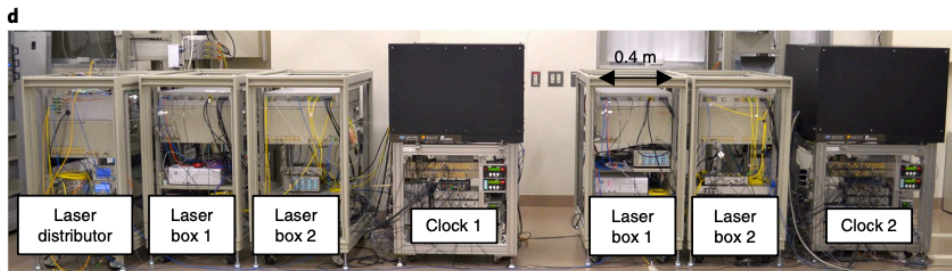
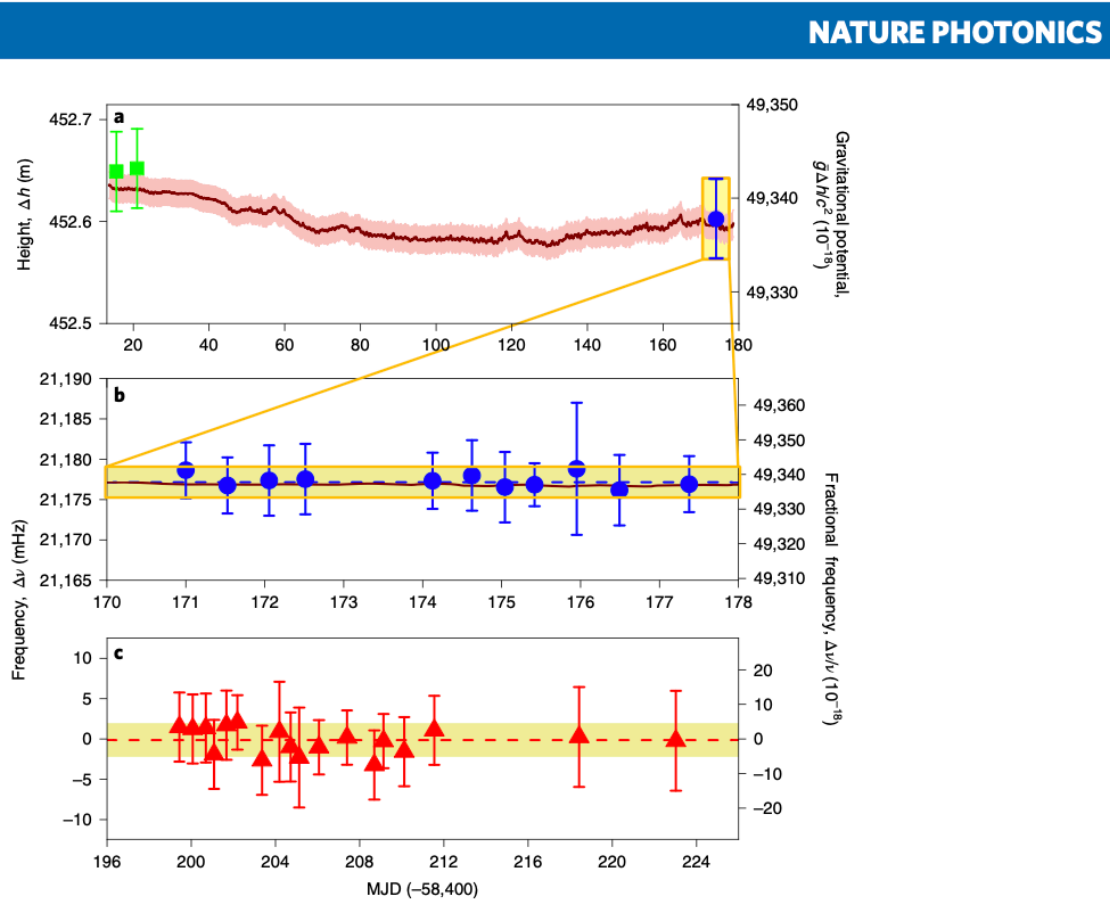
レーザー測距では

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

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



もっとも精密な時計＝光格子時計

冷蔵庫サイズの時計で、高度差450mを±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。

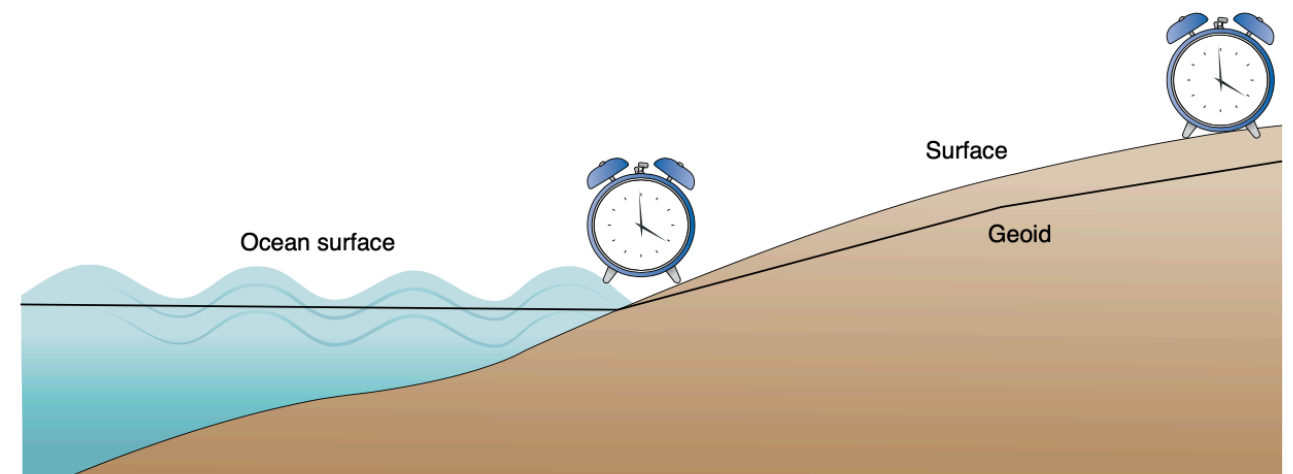
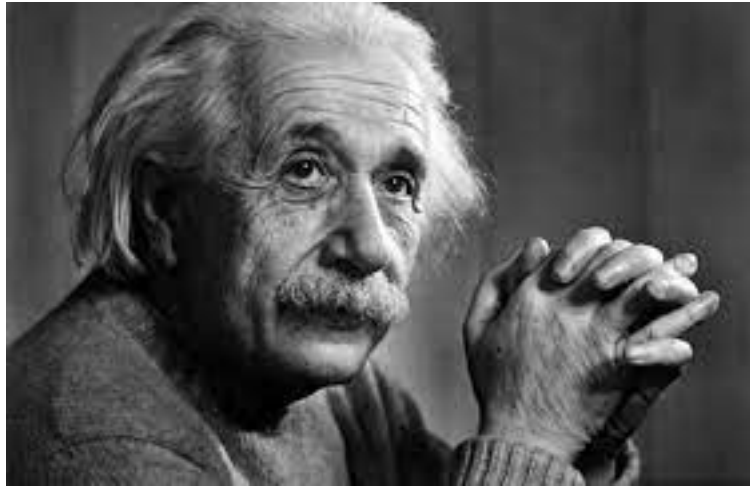


Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks. The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ. 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.

アインシュタイン自身，一般相対性理論の出す結論に困惑した



ブラックホール

特異点を生じる方程式の解を，簡単すぎる仮定をしたことに原因を押し付けた

宇宙の振る舞い

宇宙全体は膨張や収縮をする解が得られてしまい，宇宙が未来永劫不変であることを信じていたために，方程式を一部修正した。（後に撤回）

重力波

重力波の存在を一度は論文として出したが，その後座標系の変換で重力波は実在しないという論文を書いた。（査読を通らず，論文は出版されなかった）



しかし，これまで見つかった天体現象で，
アインシュタイン の予言が外れたことはない。

アインシュタインの理論はどこまで正しいのか？

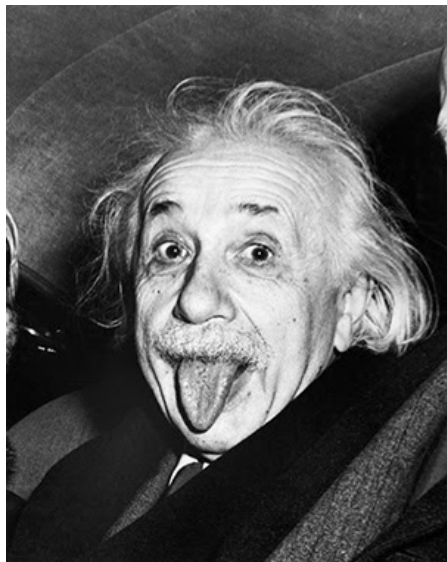
アインシュタインが相対性理論をつくって、100年。
相対性理論は、アインシュタインの想像をも越えた現象を予言してきた

相対性理論は、これまで数々の検証実験・検証観測に耐えてきた。
他の重力理論は、どんどん棄却されている。

相対性理論は、他の重力理論よりもシンプルだ。
シンプルな理論が生き残るのは、物理学の深遠さを感じる。

だけど、どこかで相対性理論の破れが見つからないと、
宇宙の始まりを議論できる次の理論へたどり着けない...

アインシュタインが正しくて、嬉しいような、残念なような...



ほらね！