

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何が先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？**

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

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



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

"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

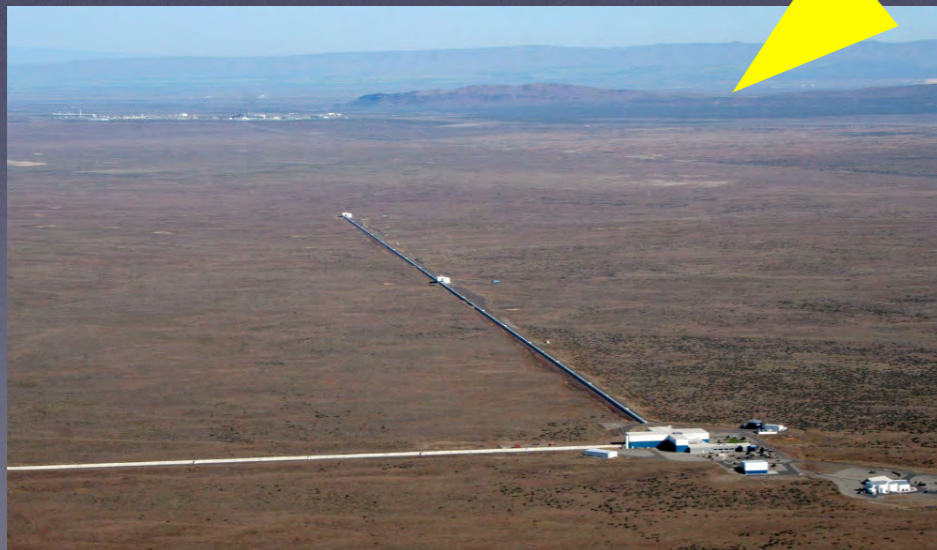
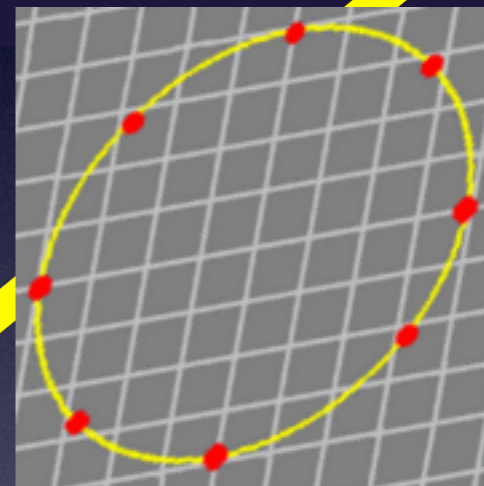
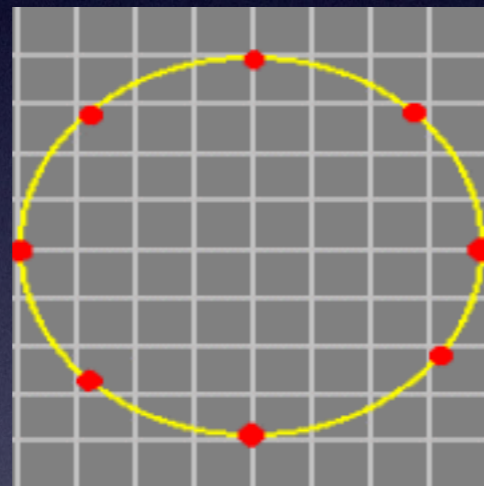
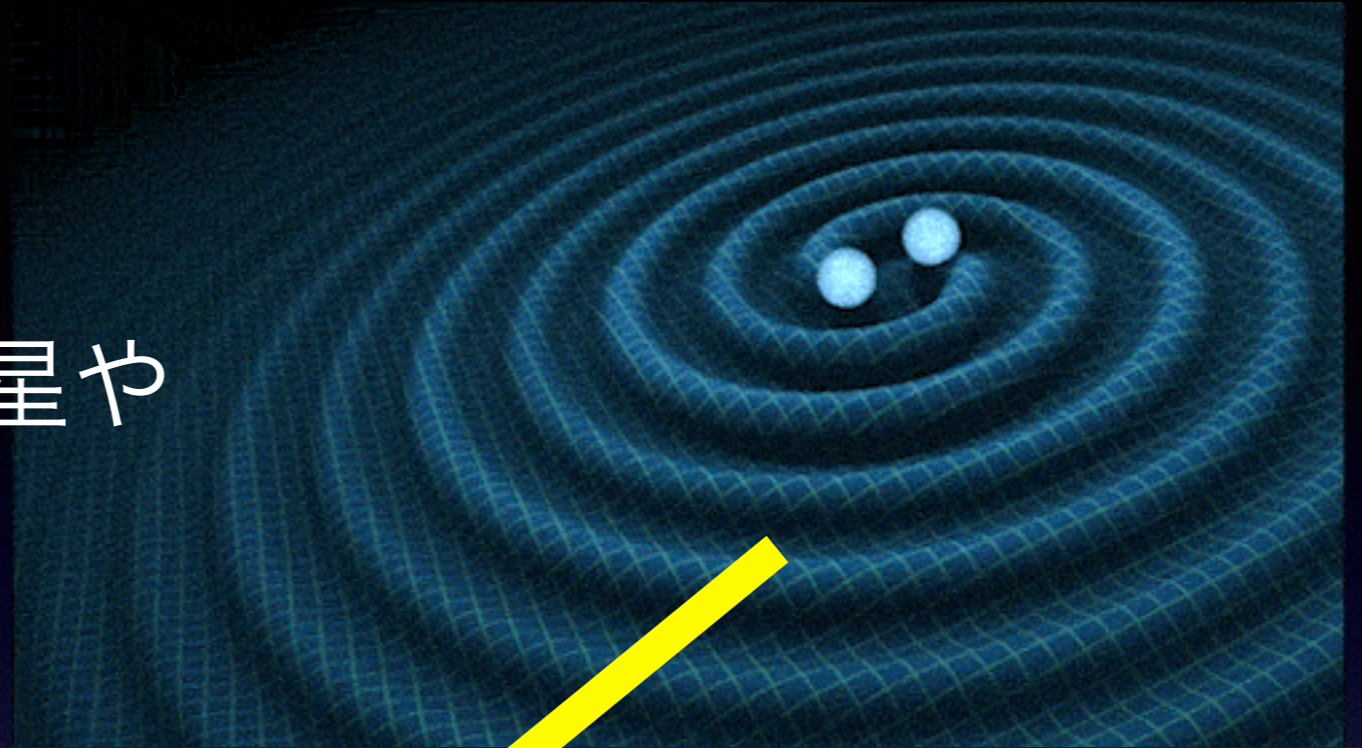
ライナー・ワイス(85)

バリー・バリッシュ(77)

キップ・ソーン(77)

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

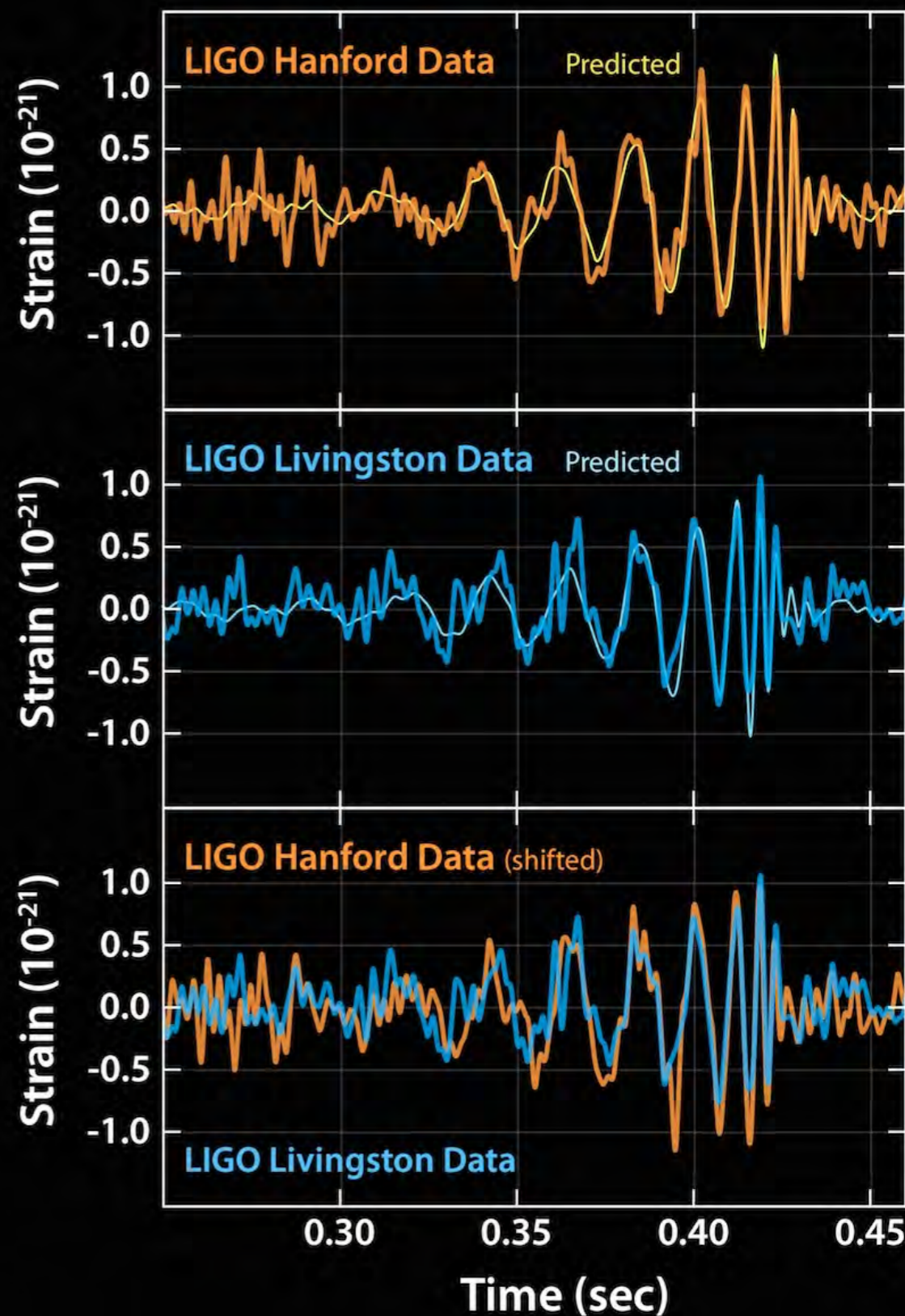
Gravitational-Wave Observatory

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

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



重力の正体は？

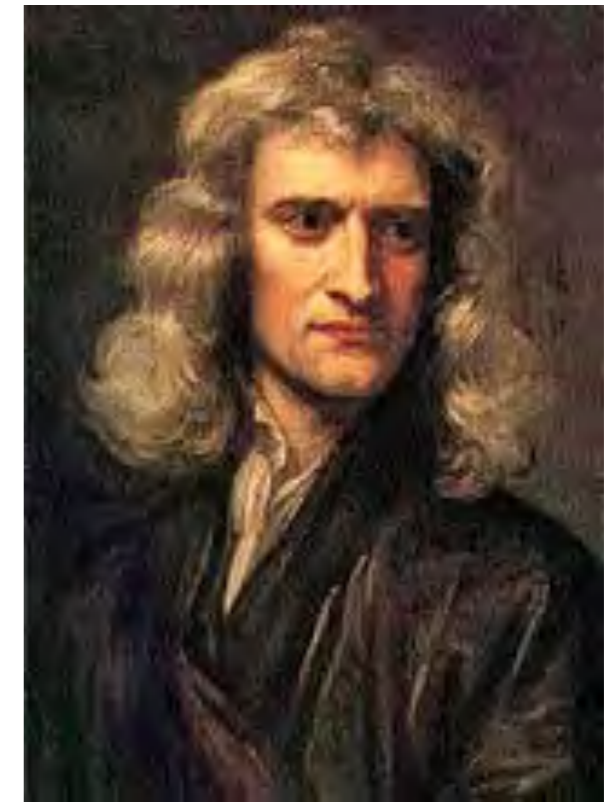
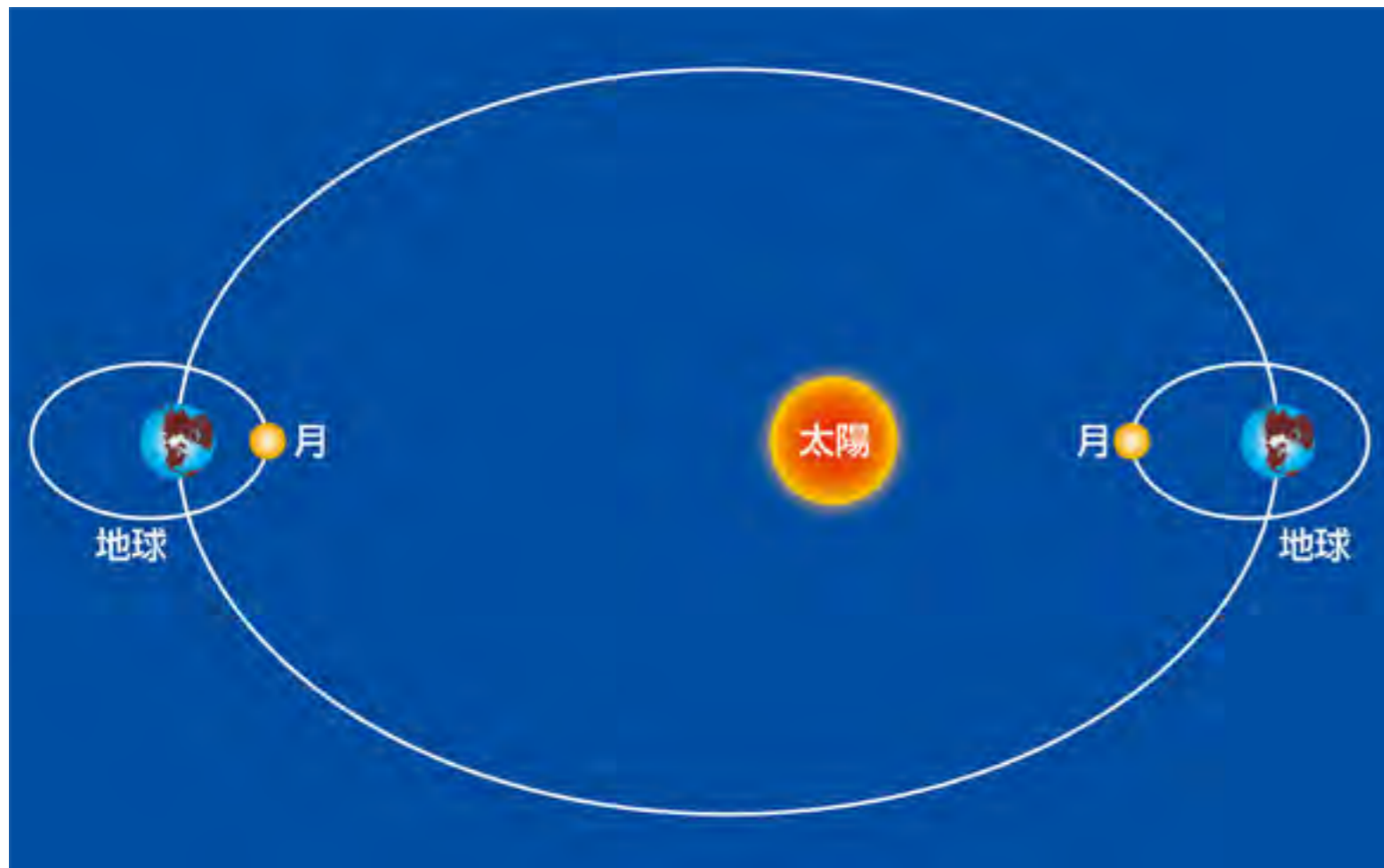


by Frits Ahlefeldt

アイザック・ニュートン



重力の正体は？



ニュートン

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

万有引力

＝すべてのものは引力で引き合う

重力の正体は？



「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

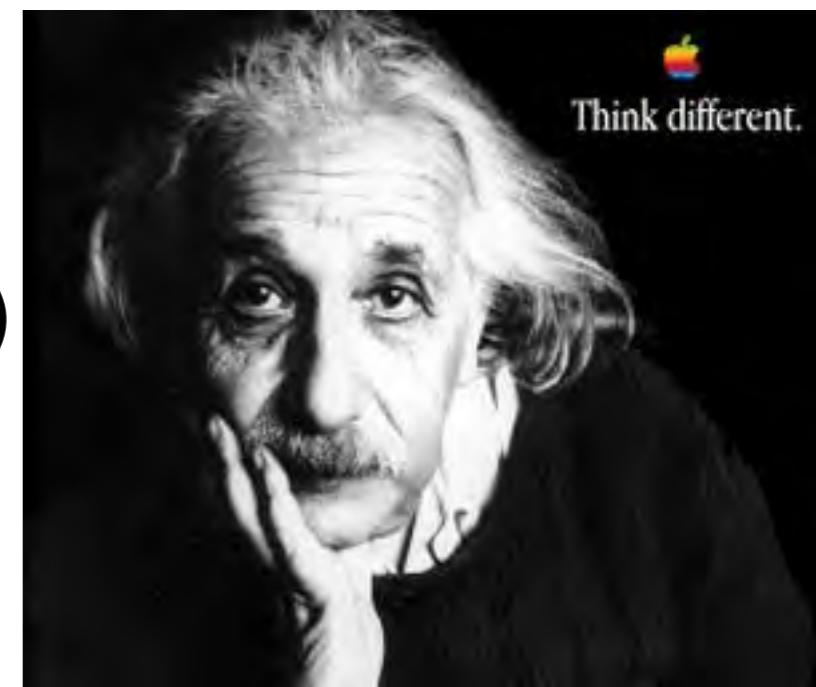
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$$

「時空のゆがみだ」

(アインシュタイン, 1915)

一般相対性理論



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

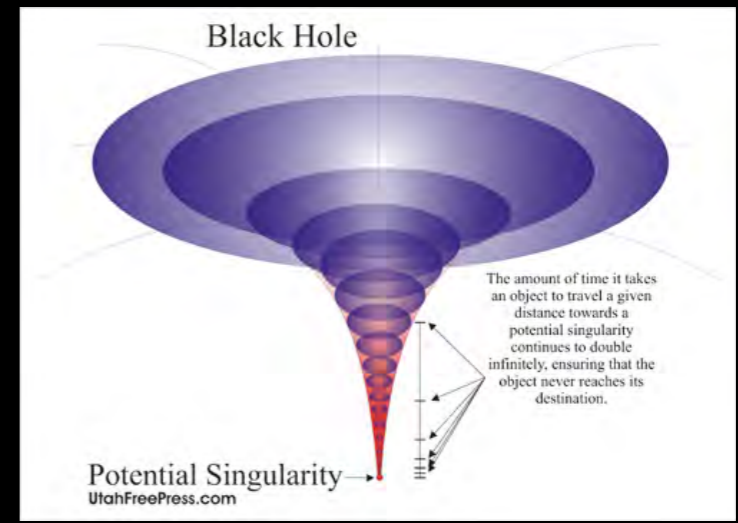
$$\frac{d^2 \xi^\mu}{d\tau^2} = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma} \frac{d\xi^\nu}{d\tau} \frac{d\xi^\rho}{d\tau} \xi^\sigma$$



FailsShot



Subscribe UP



ブラックホール

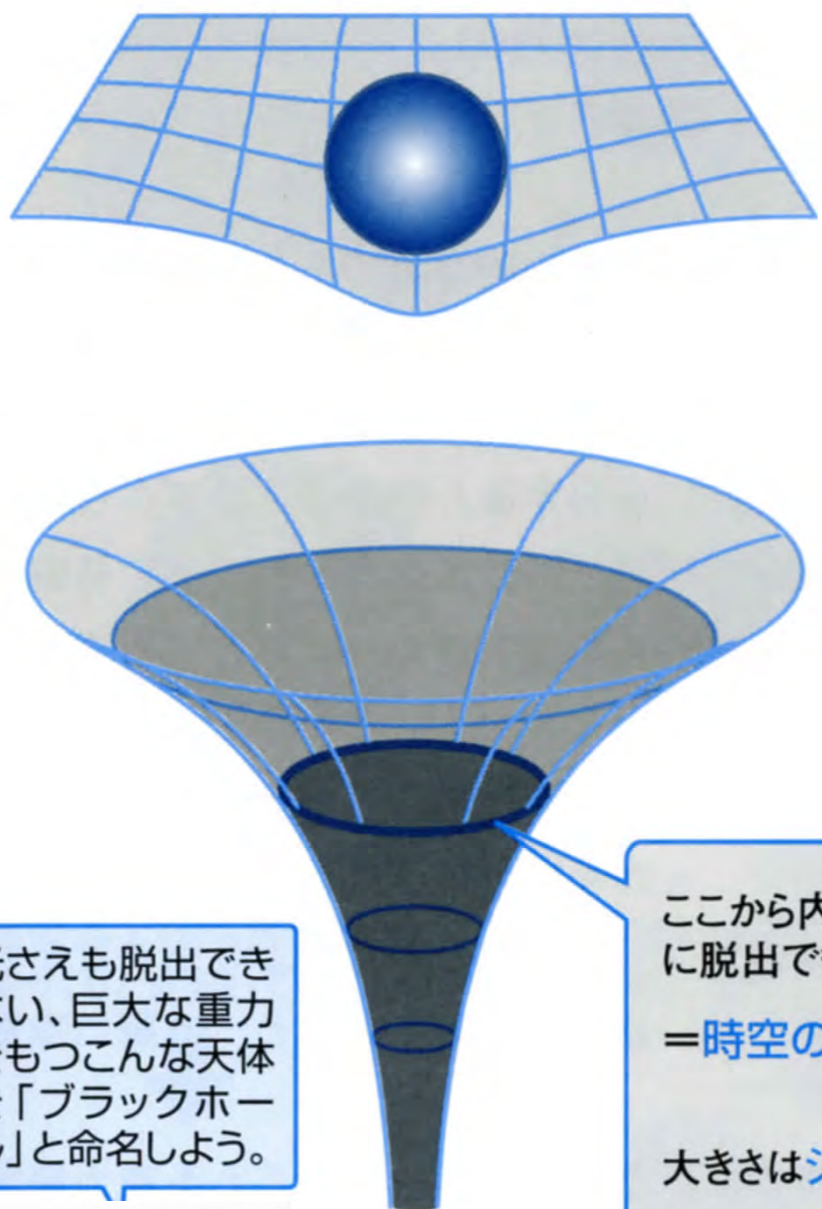
ブラックホール

= 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)



重い物体の周りでは
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。

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

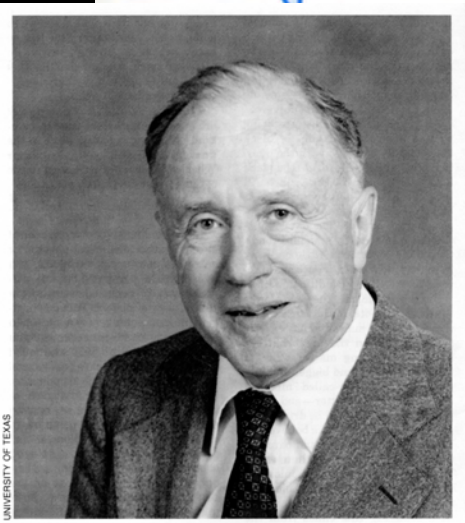
大きさはシュワルツシルト半径 r

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

(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。

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。



ホイーラー

重い星が燃え尽きると 中性子星やブラックホールに

褐色矮星
質量：太陽の0.08倍
表面温度：1000°C
寿命（主系列）：不明

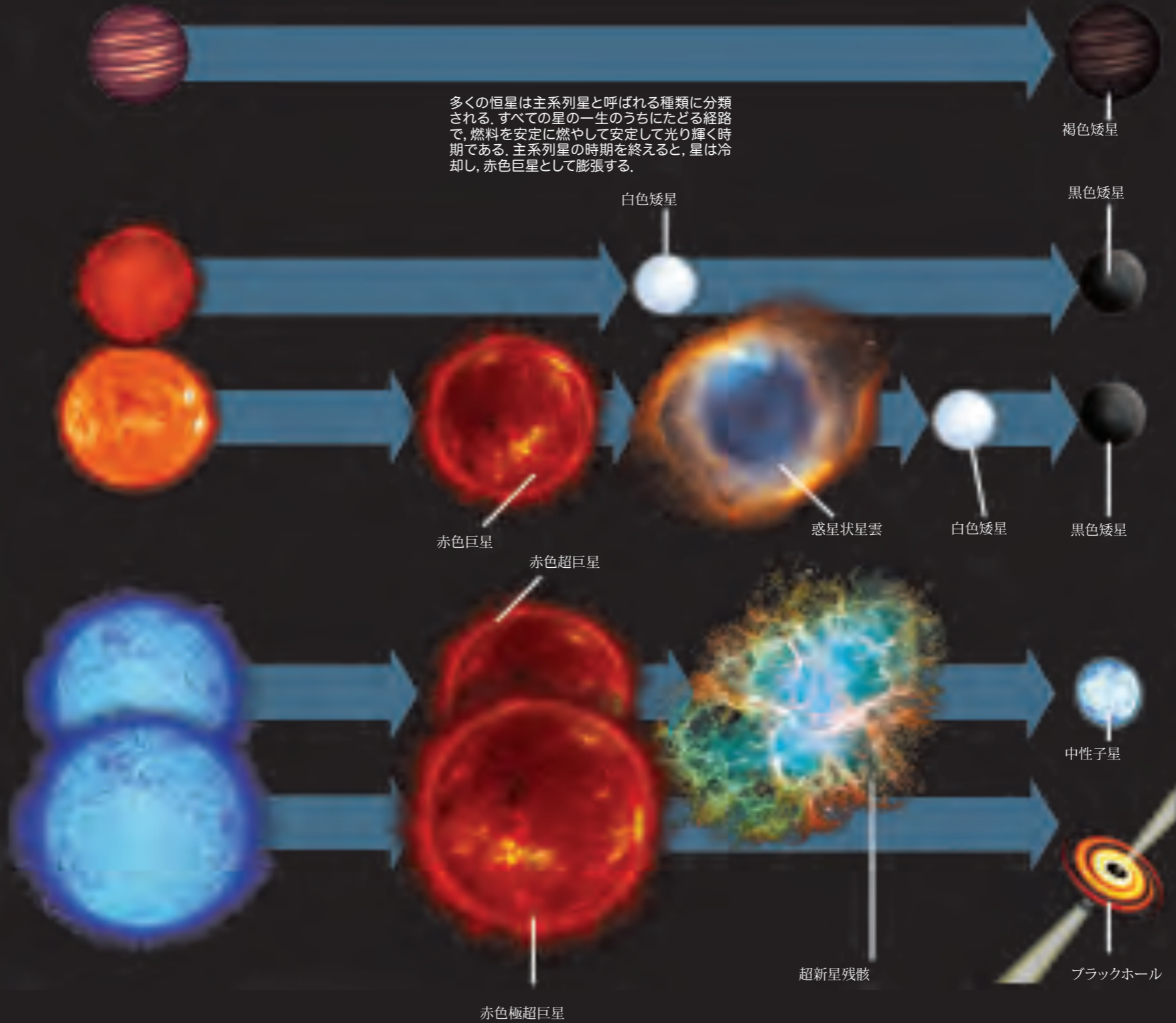
赤色矮星
質量：太陽の0.2倍
表面温度：3000°C
寿命：10兆年

太陽型恒星
質量：太陽の1倍
表面温度：5000°C
寿命：100億年

超巨星
質量：太陽の20倍
表面温度：12000°C
寿命：500万年

極超巨星
質量：太陽の100倍
表面温度：40000°C
寿命：100万年

多くの恒星は主系列星と呼ばれる種類に分類される。すべての星の一生のうちにとどる経路で、燃料を安定に燃やして安定して光り輝く時期である。主系列星の時期を終えると、星は冷却し、赤色巨星として膨張する。



宇宙のつくり方 (ギリランド著, 真貝・鳥居訳, 丸善出版)



はくちょう座 X-1はブラックホール



6000光年先



はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座

銀河中心

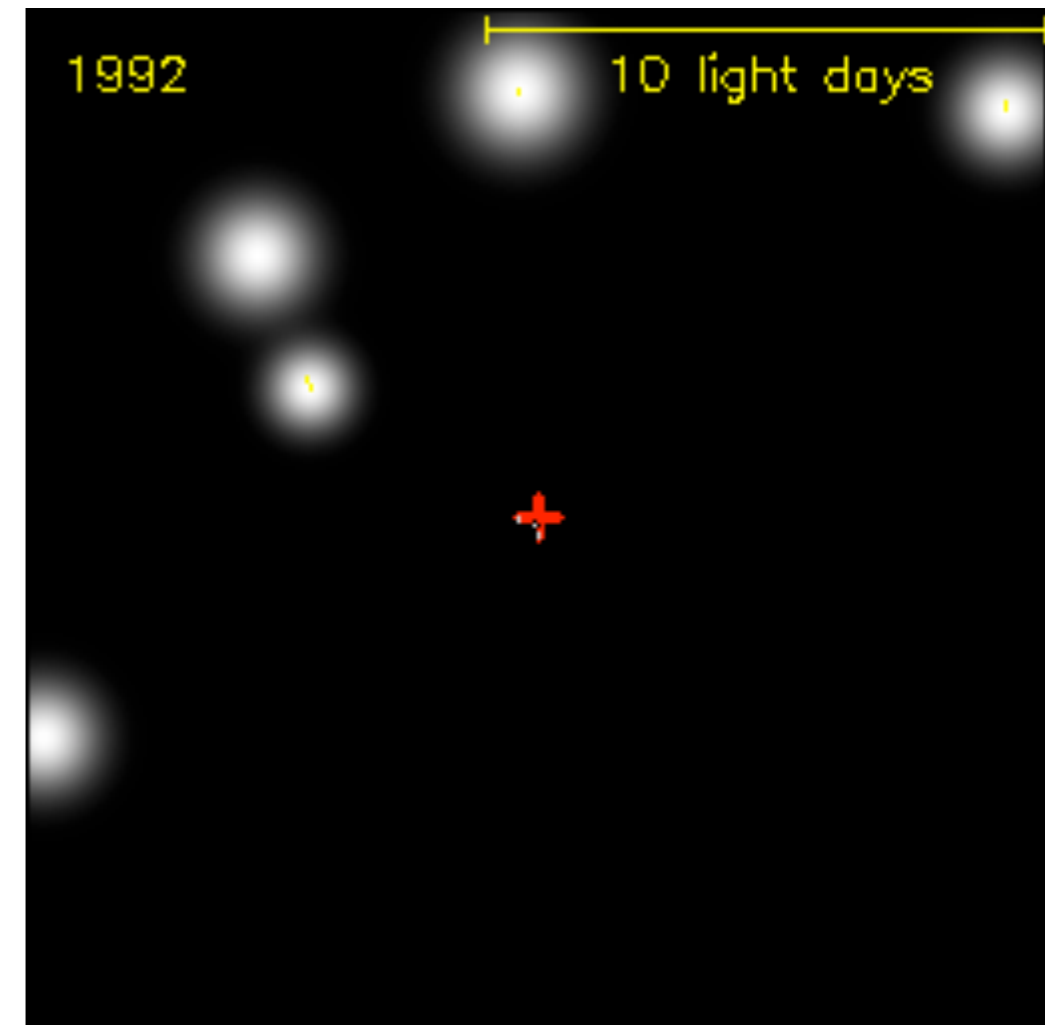
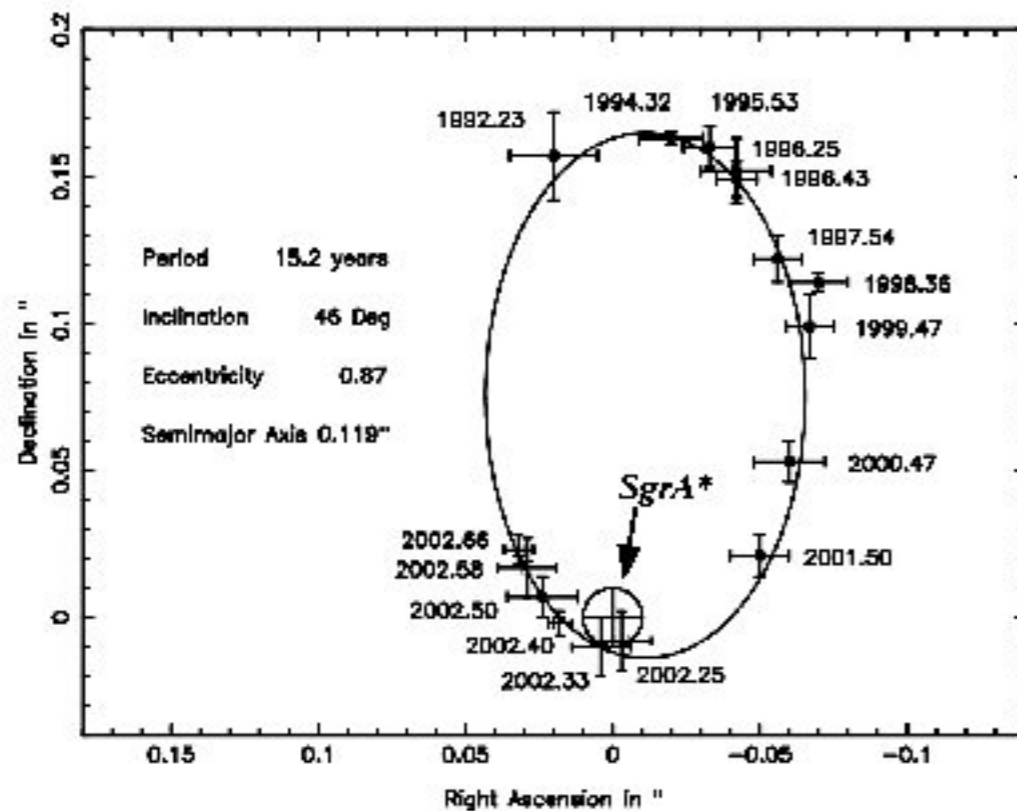
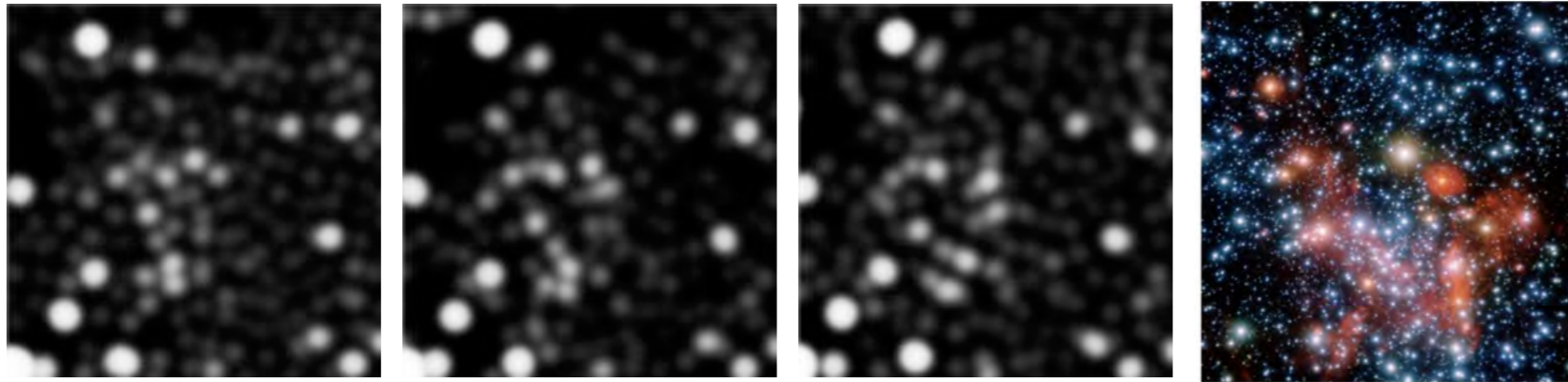


いて座



さそり座

S2 orbit around Sgr A*



我々の銀河中心には、
太陽の420万倍の質量の
ブラックホール！

<http://www.extinctionshift.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>



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.

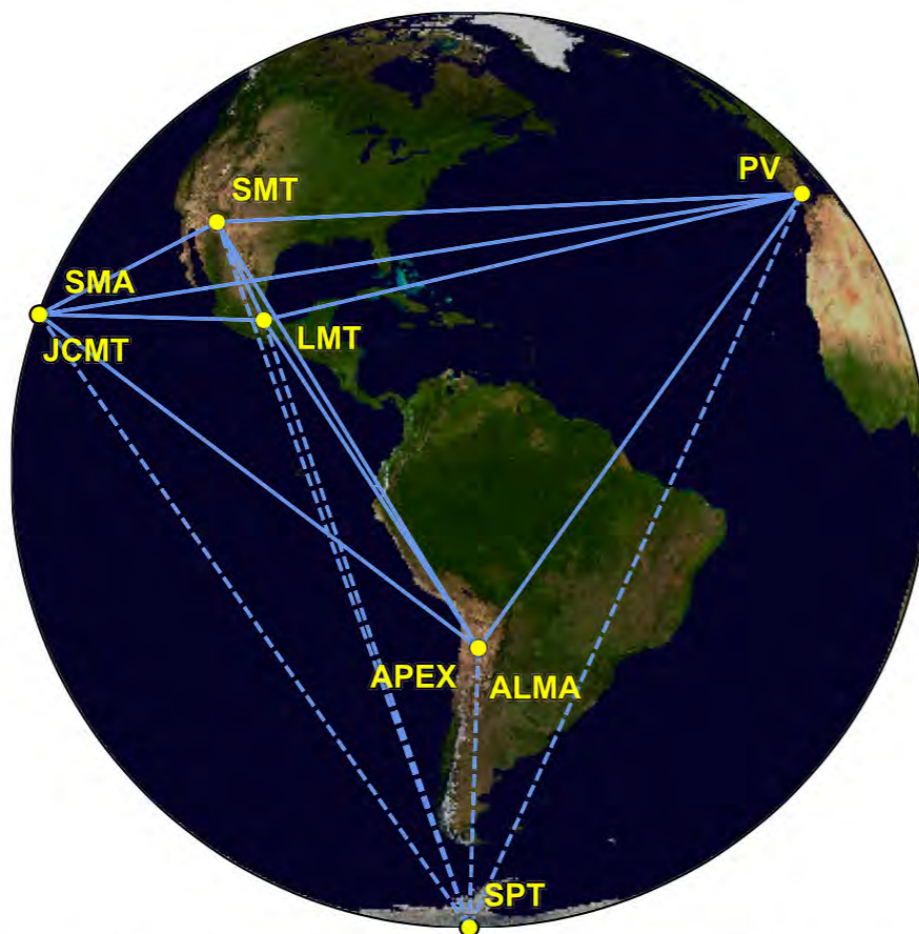


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

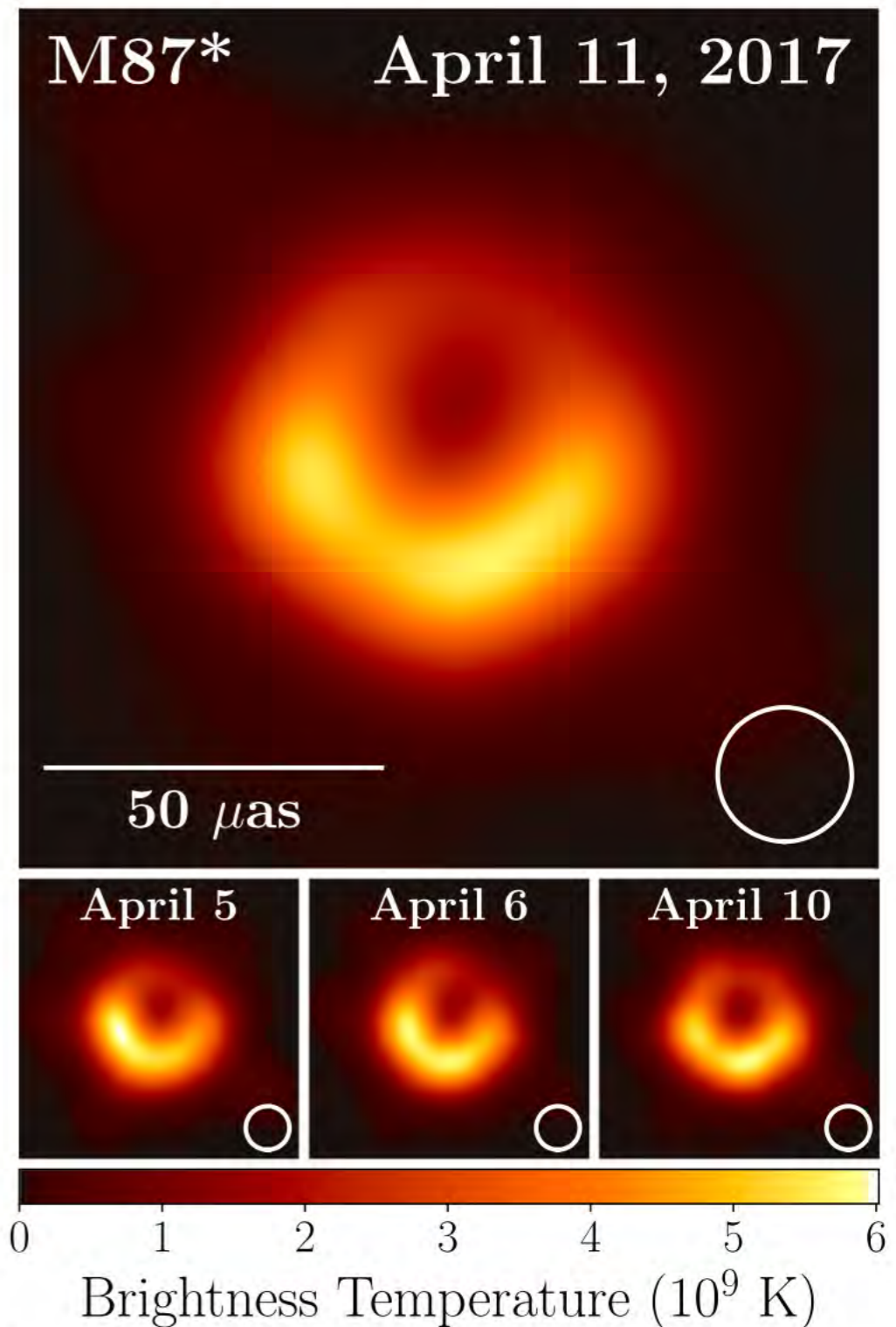


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the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

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-eht.html>

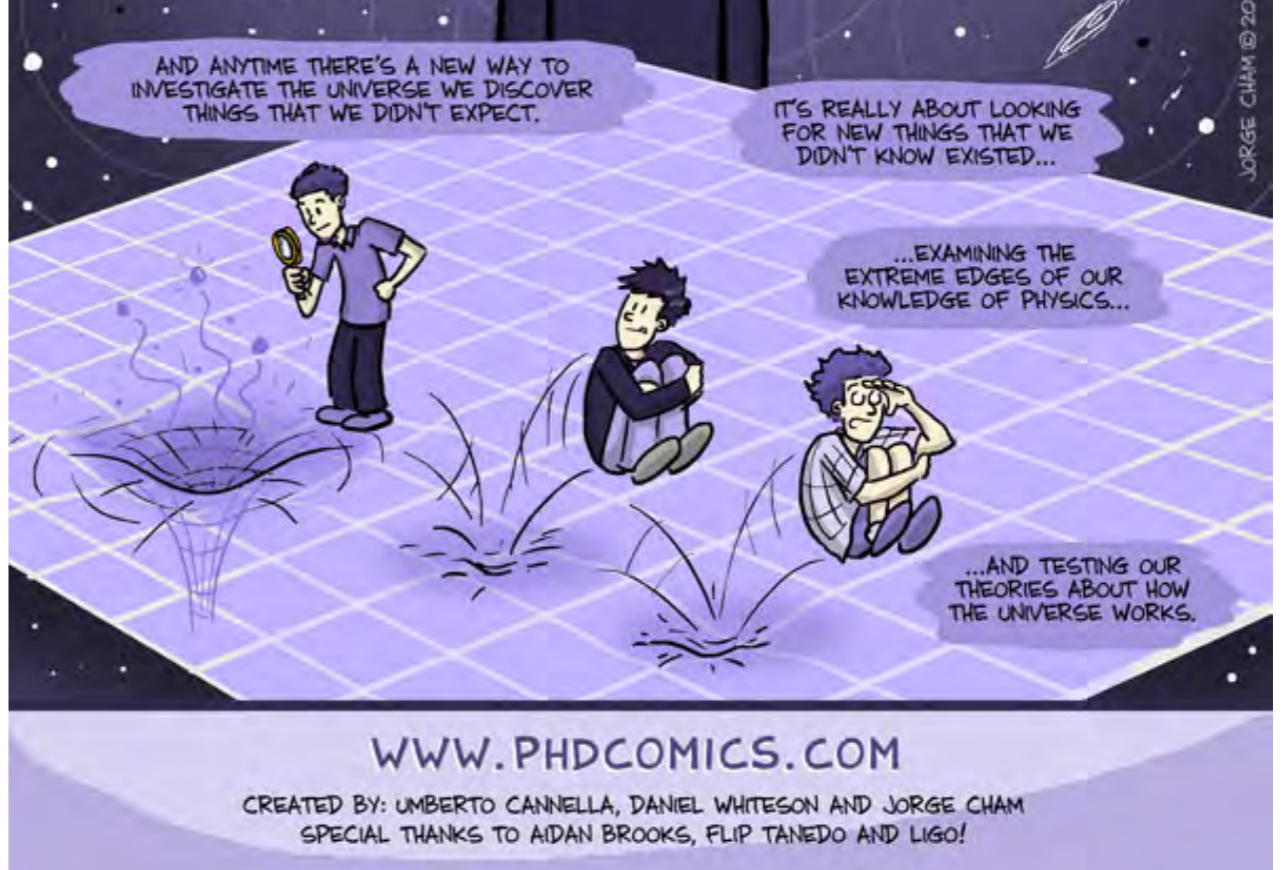
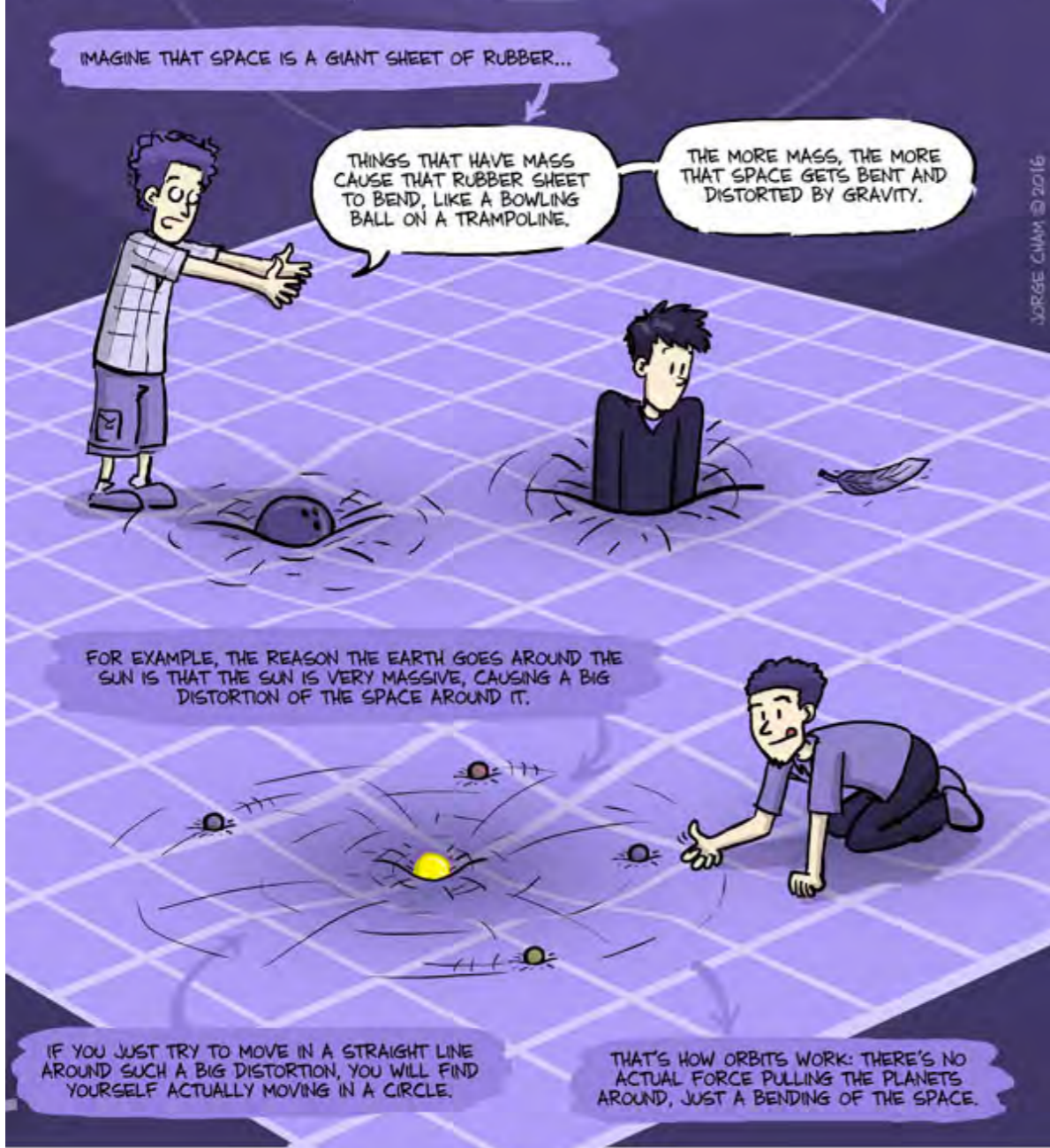
ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

The image shows a central dark circular region, the shadow of the black hole, surrounded by a bright, glowing ring of light. The colors transition from bright yellow and white at the inner edge of the ring to deep red and orange towards the outer edge, set against a black background.

EHT image

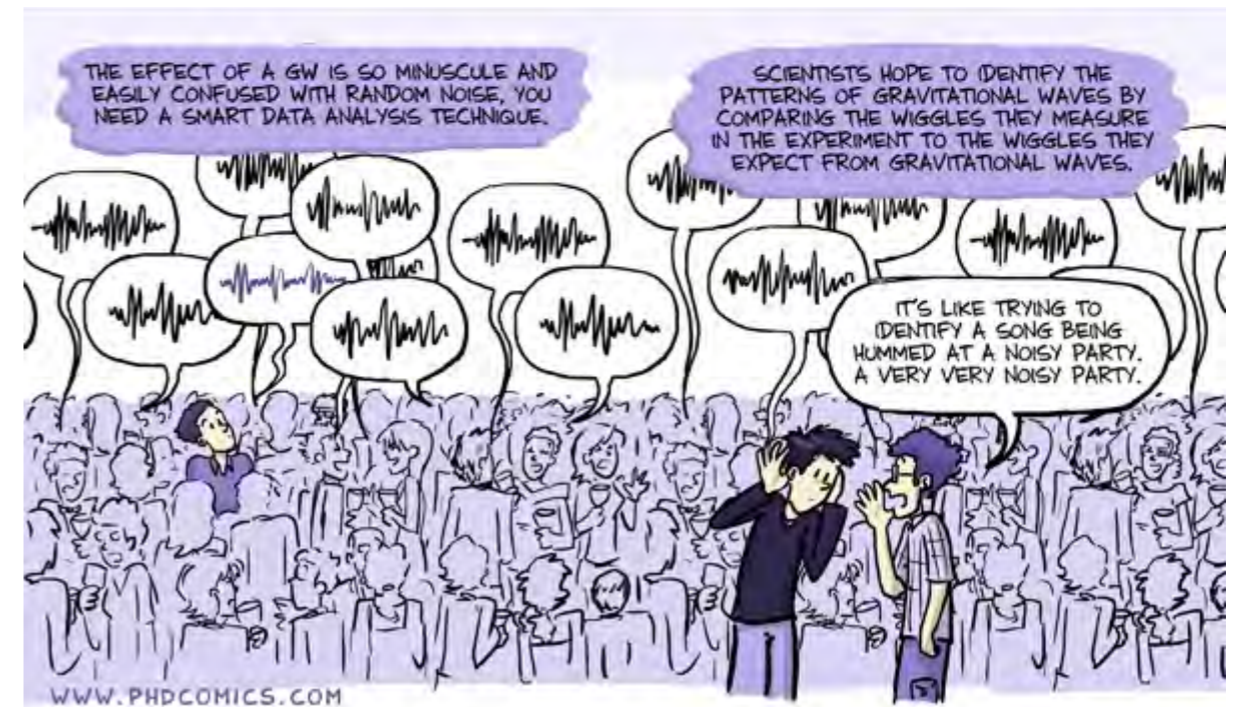
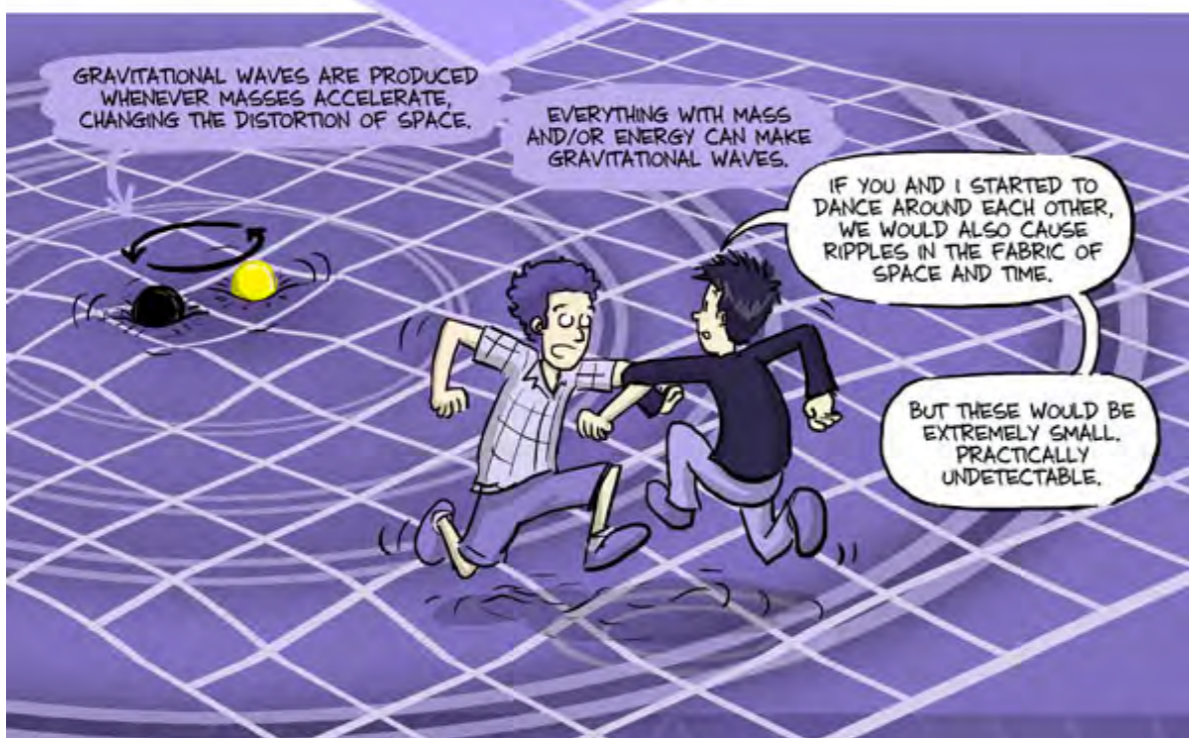
<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eh/ideos.html>

0'58"



www.phdcomics.com

“gravitational waves explained”



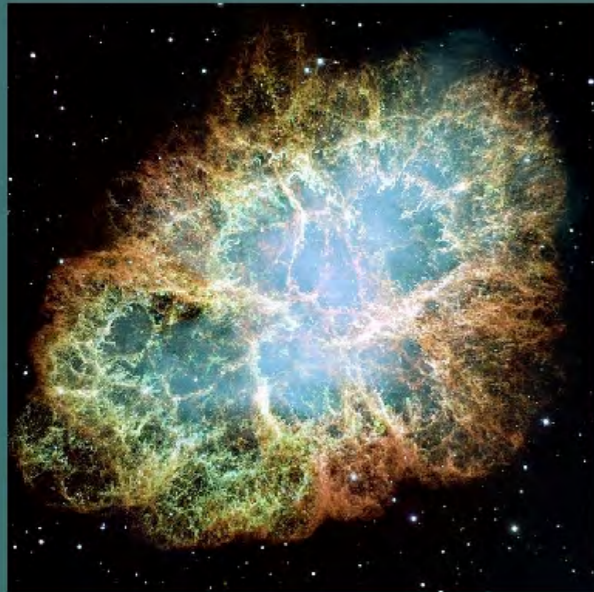


重力波の波源

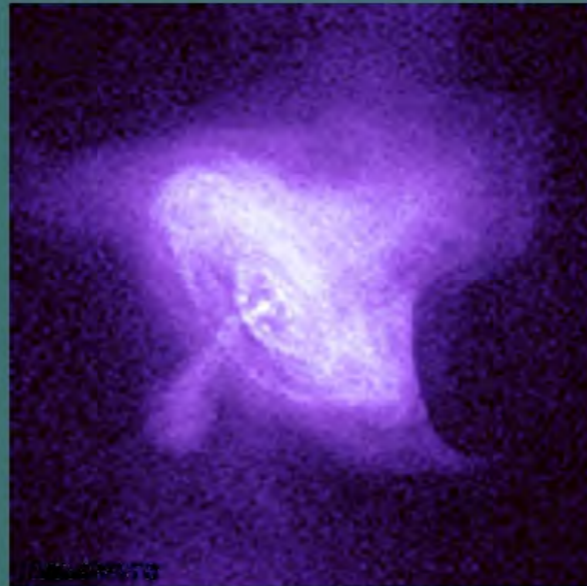
sources of gravitational wave

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

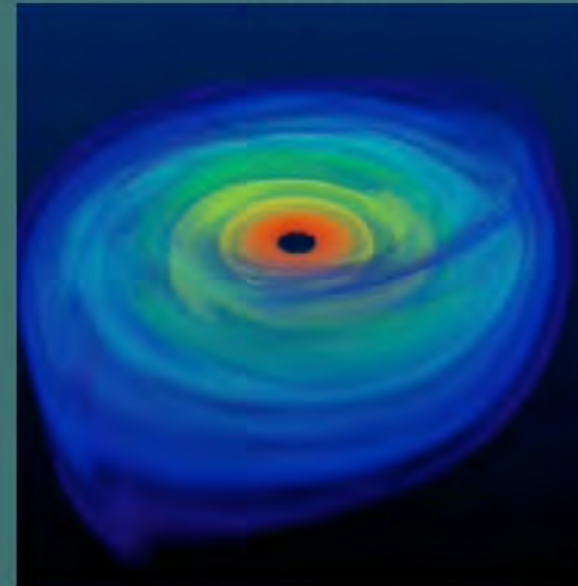
超新星爆発 (写真出典: NASA)



パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)



連星中性子星合体
(想像図)



予測が難しい

振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体を
ターゲットに

重力波は弱いのであらかじめ、波形の予測が必要
ノイズにまみれたデータに、予測した波形があるか探す

重力波 幻の発見 (1968/70)



ウェーバー
Joseph Weber

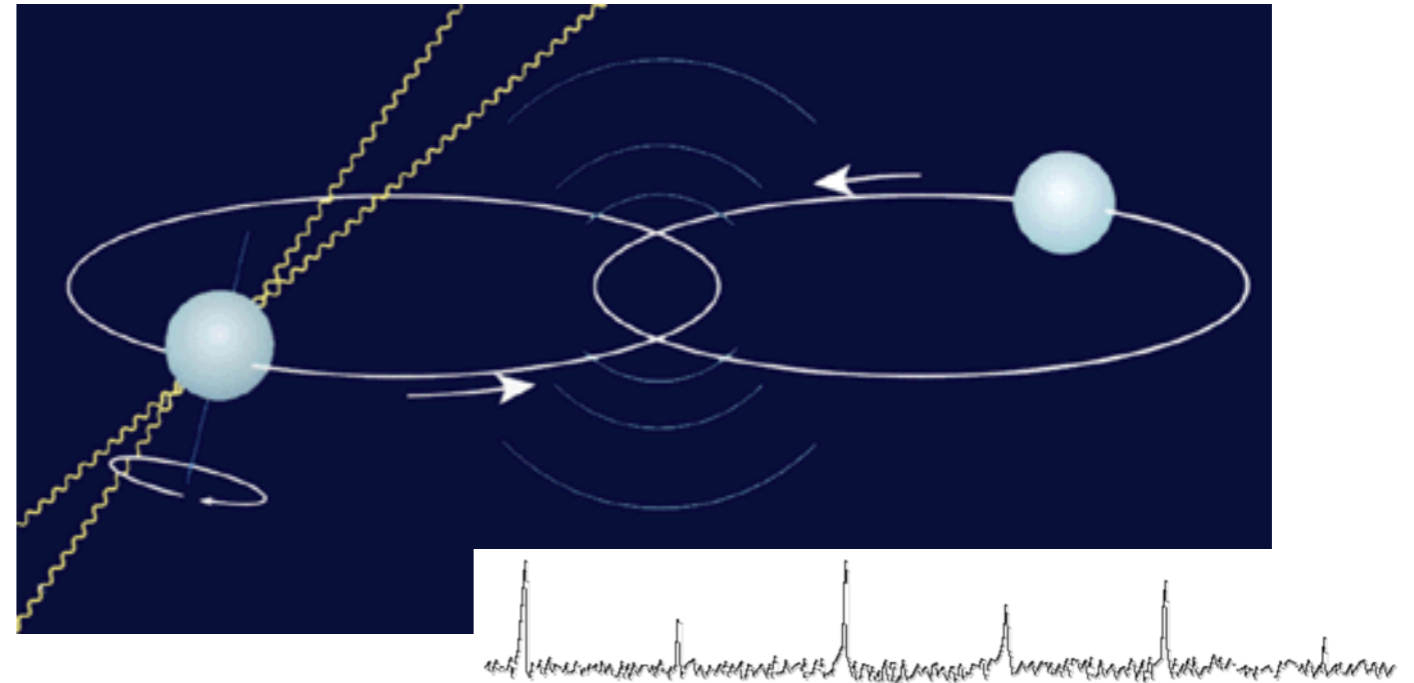
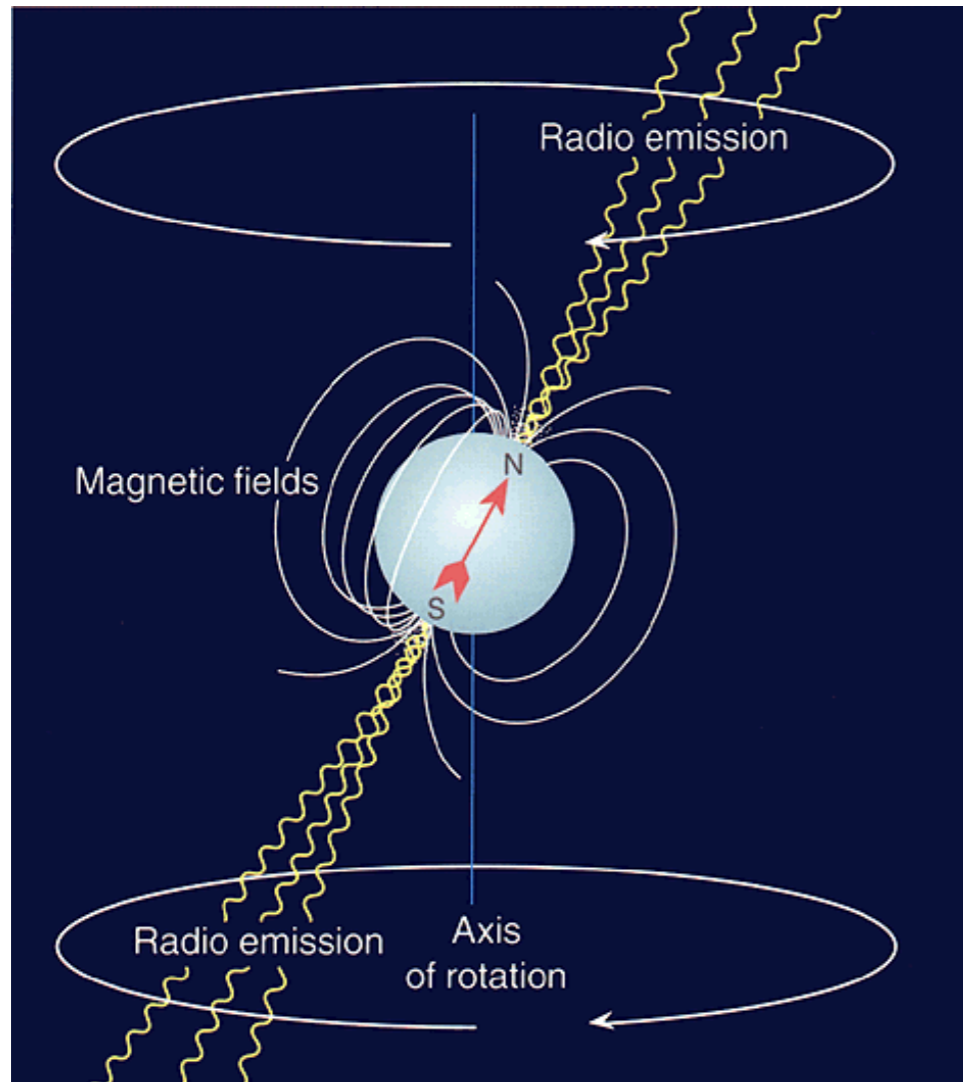
Joseph Weber (**pictured**), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that 'rang' when it was struck by such a wave². His result was never replicated, and was eventually rejected by nearly everyone except Weber himself. Nonetheless, his work drew many other researchers into the gravitational wave field.

68年に「**2台の装置で同時に重力波信号を検出**」

70年に「**重力波信号はおよそ一日に三回の頻度で検出され、検出装置が銀河の中心に対して垂直方向に向いているときに検出率が高い**」

と発表した**が、他のグループで追試されず。**

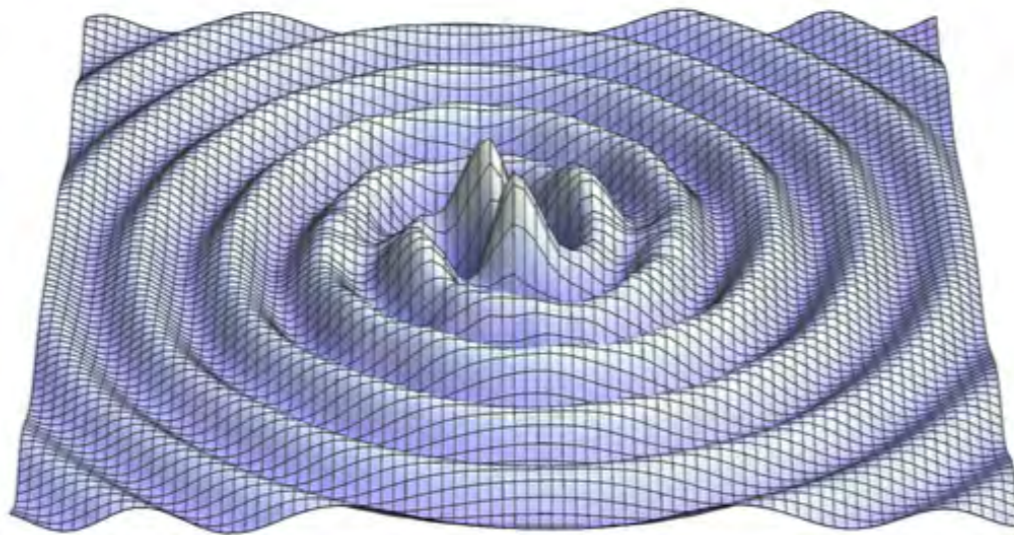
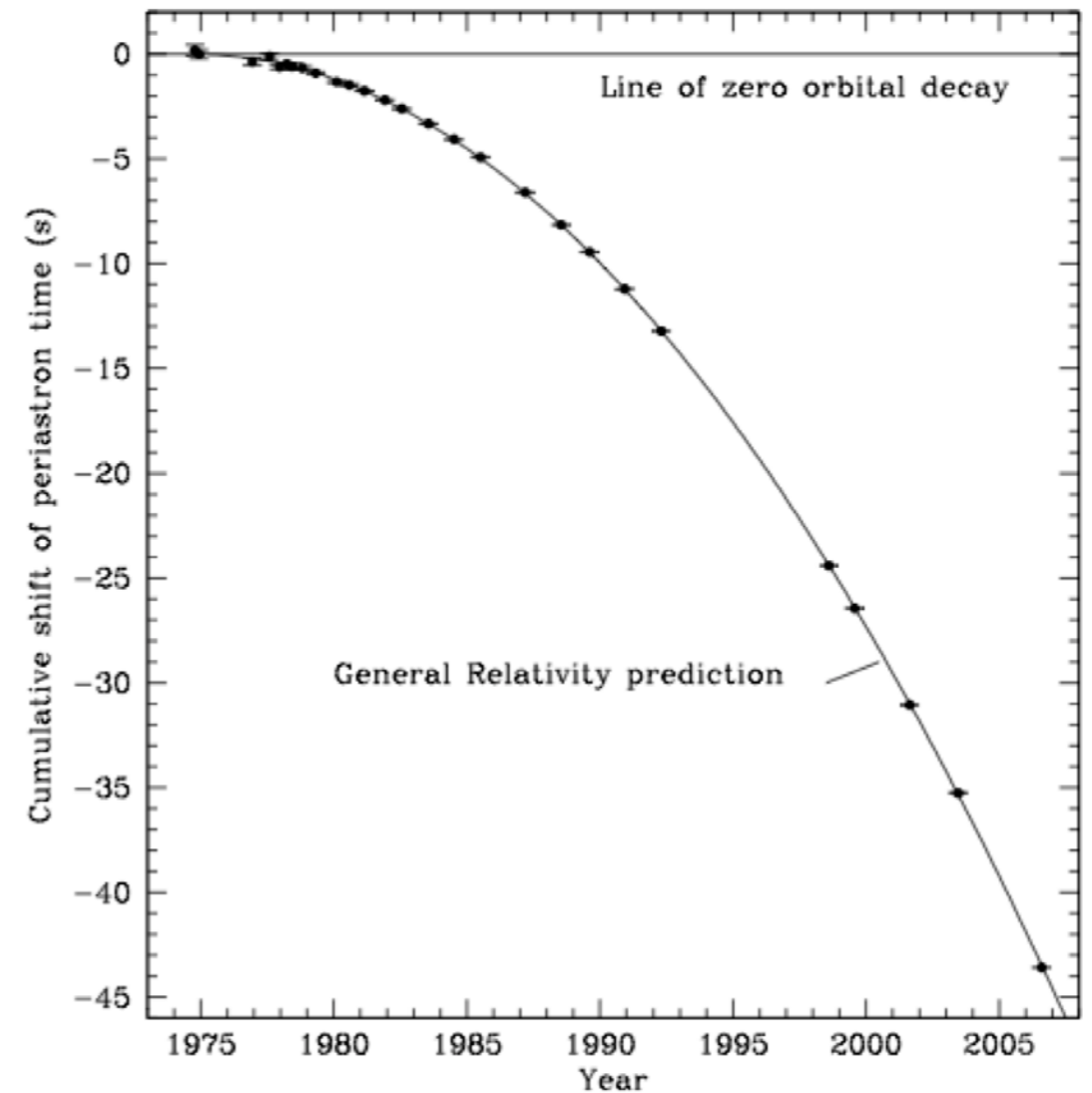
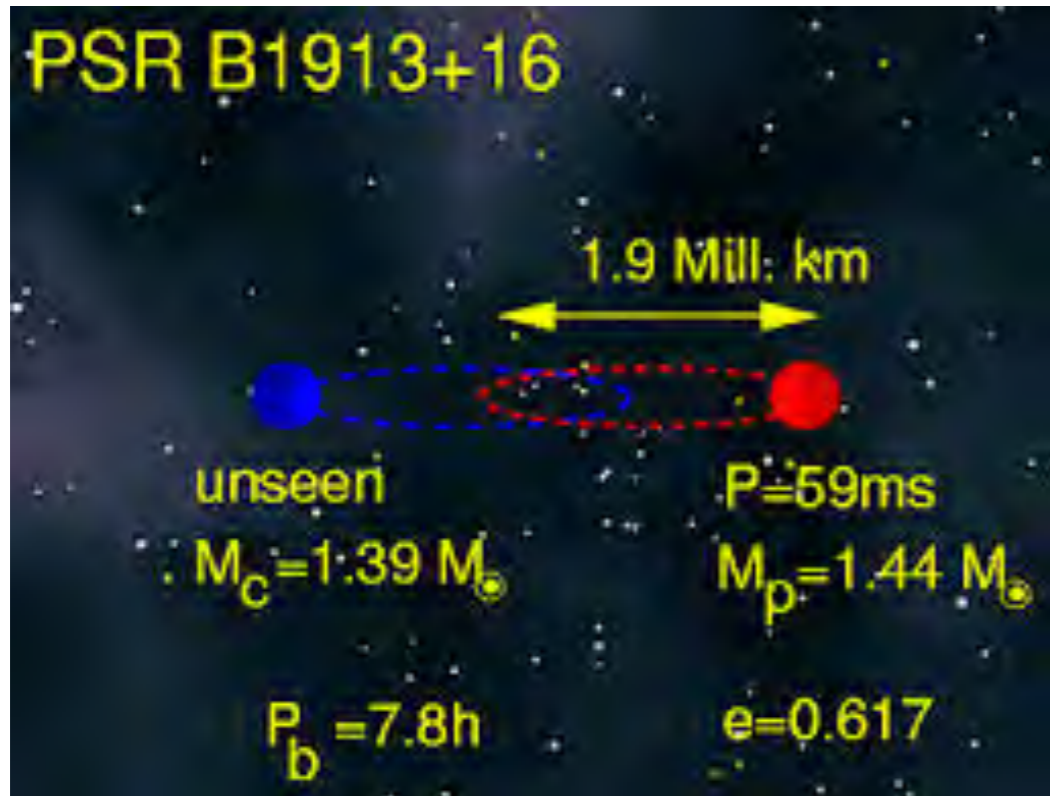
連星中性子星の発見 (1974)



パルサー = 中性子星
半径 10km位
質量 1.4x太陽

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/illpres/discovery.html

連星中性子星の発見 (1974)



重力波を放出してエネルギーを失うので、星が近づいてゆく。

重力波の存在が間接的に確かめられた

連星中性子星の発見 (1974)

The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.

Share this:     25

The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse
Prize share: 1/2

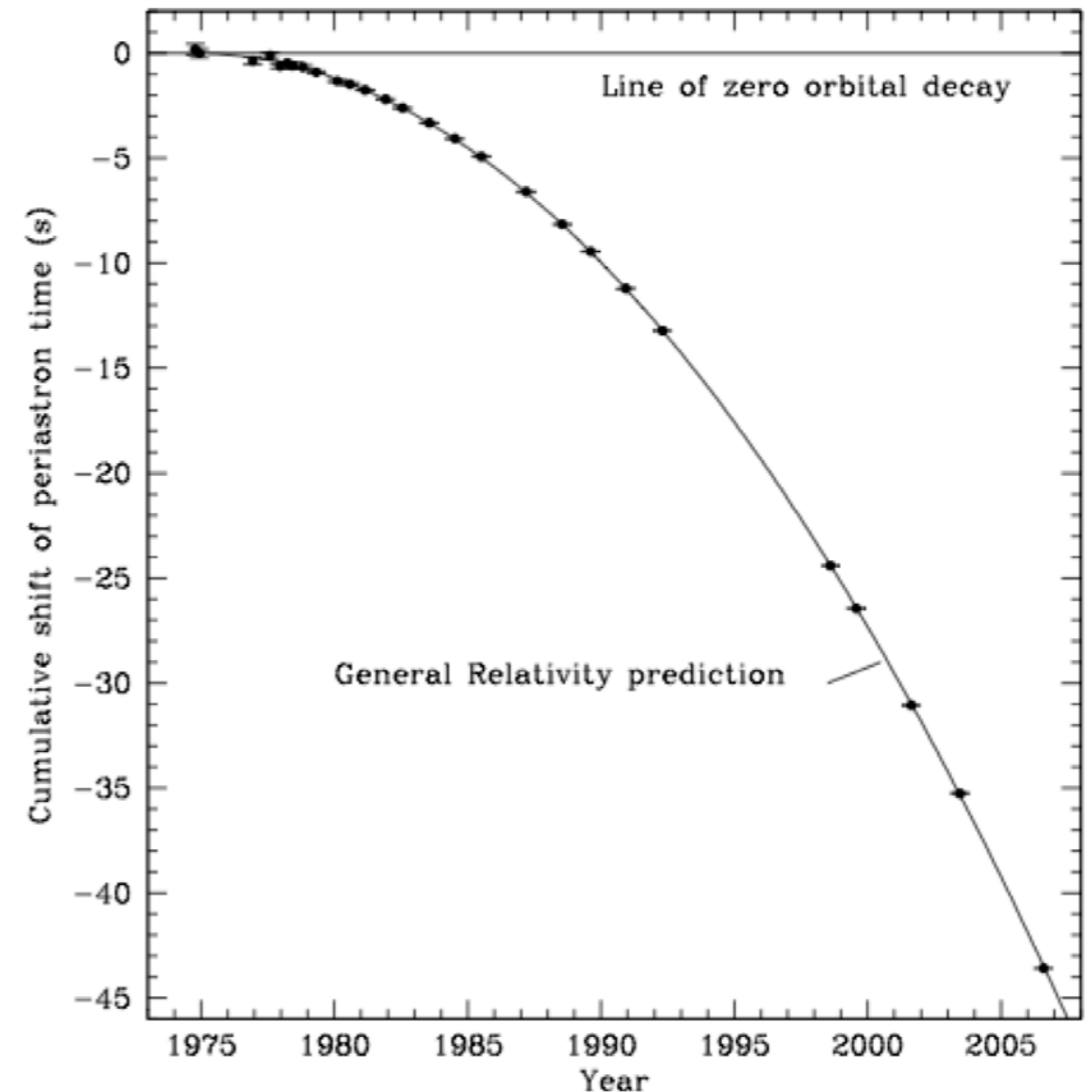


Joseph H. Taylor Jr.
Prize share: 1/2

"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

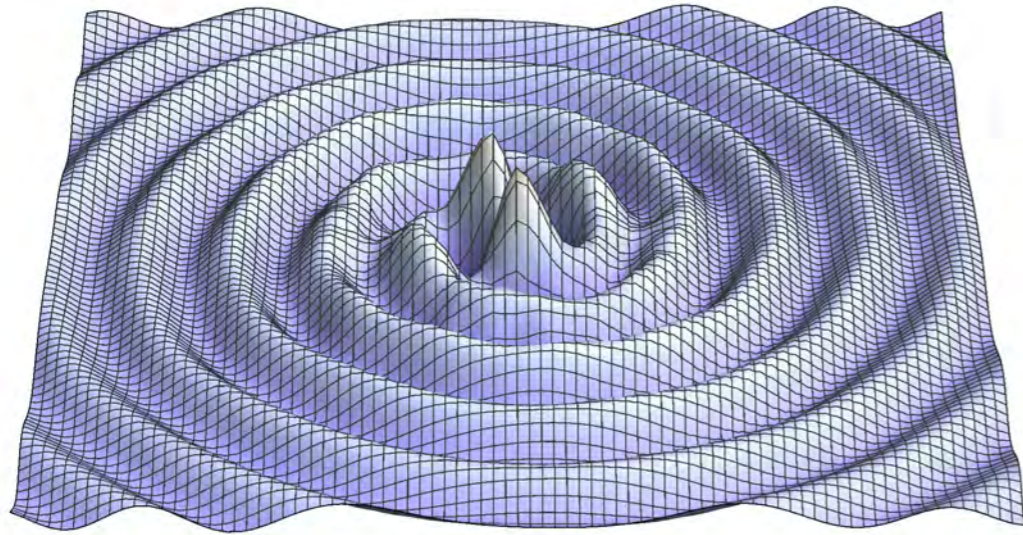
"重力についての新しい研究を開いた, 新種の
パルサーの発見に対して"

重力波の存在が間接的に確かめられた



重力波の存在が間接的に確かめられた。

重力波の直接観測をしたい！



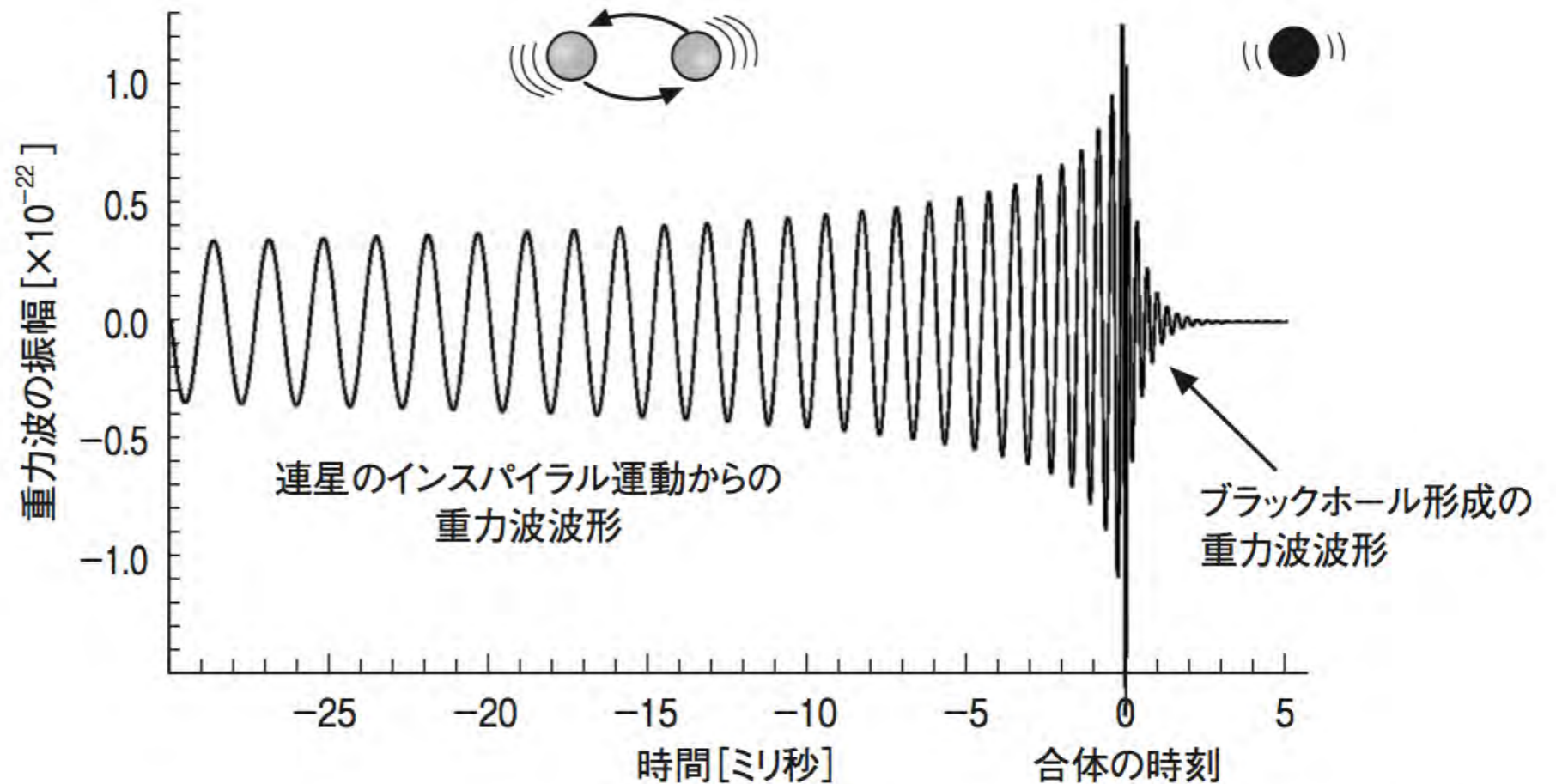
連星中性子星

連星ブラックホール

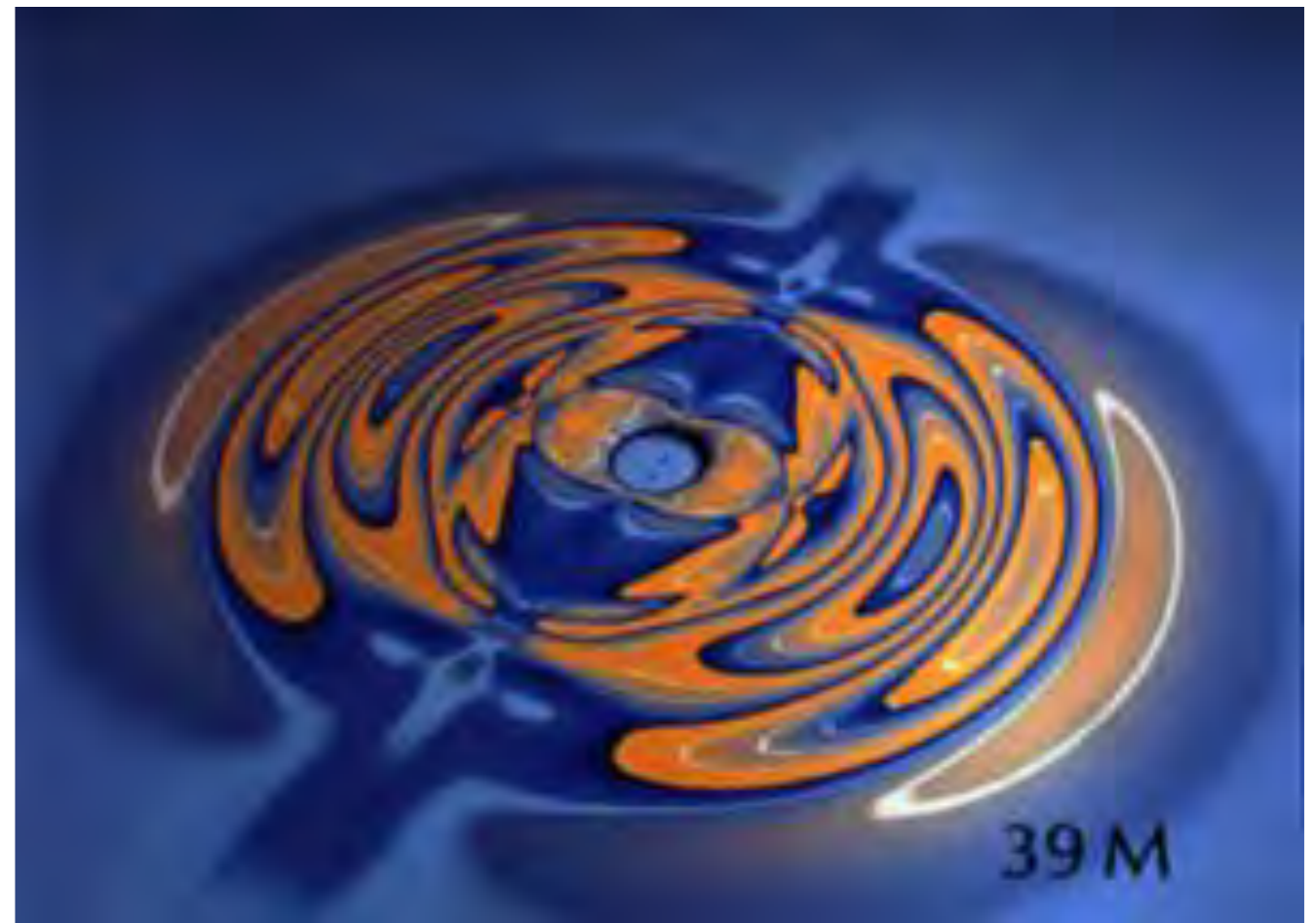
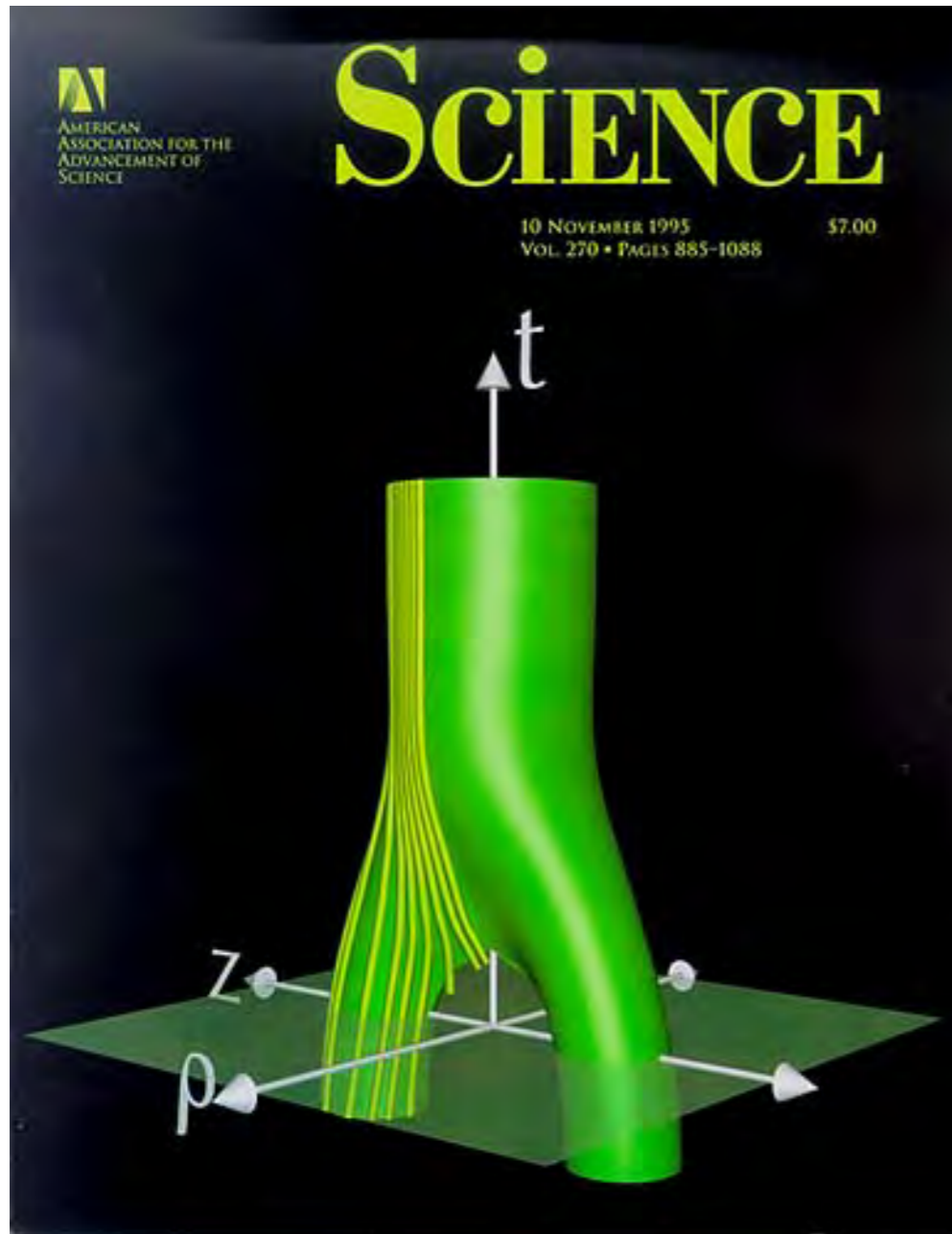
インスパイラル

合体

リングダウン

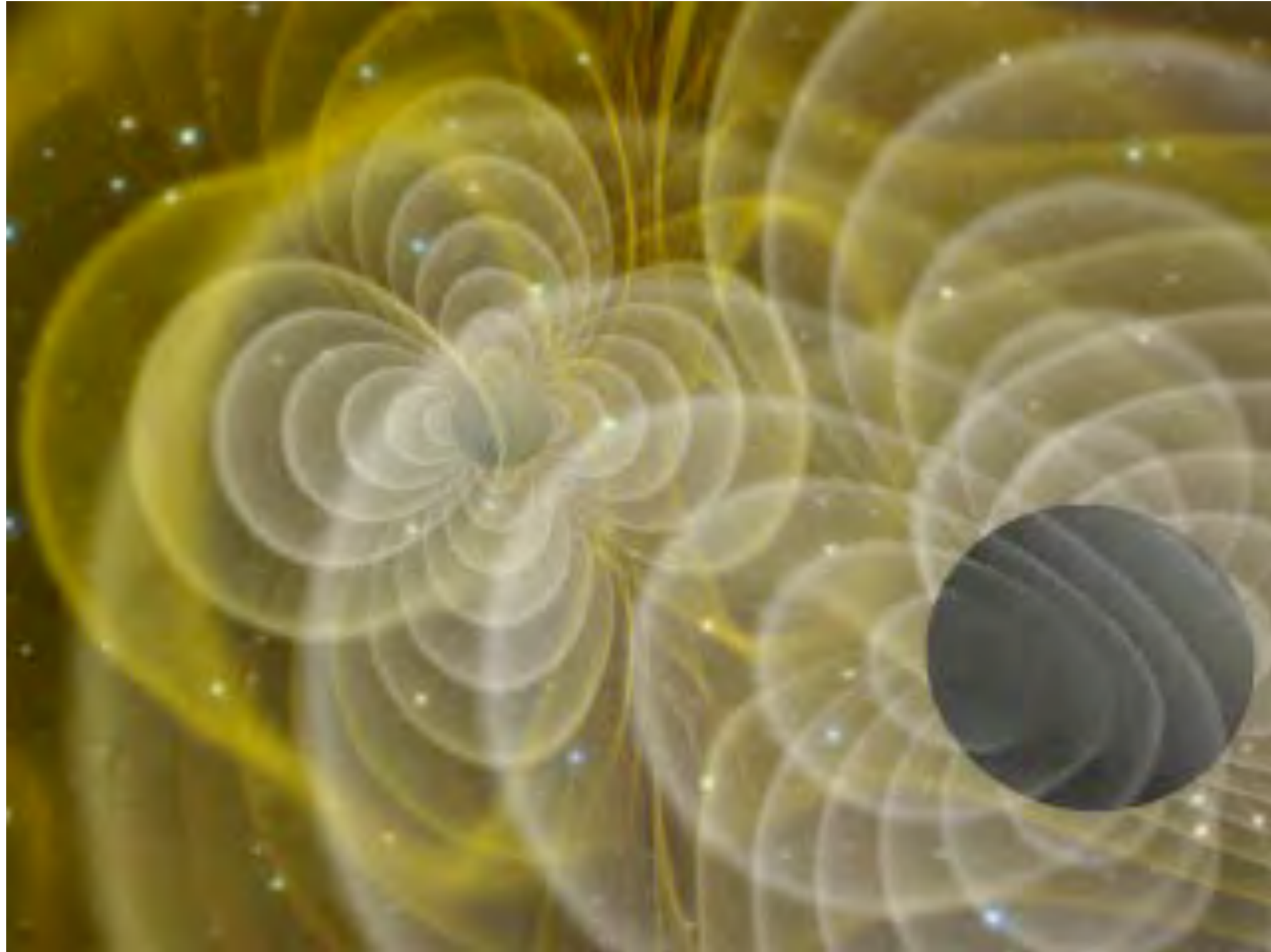


ブラックホールの合体シミュレーション



2つのブラックホールの合体と重力波放出
(90年代, NCSAグループ)

ブラックホールの合体シミュレーション



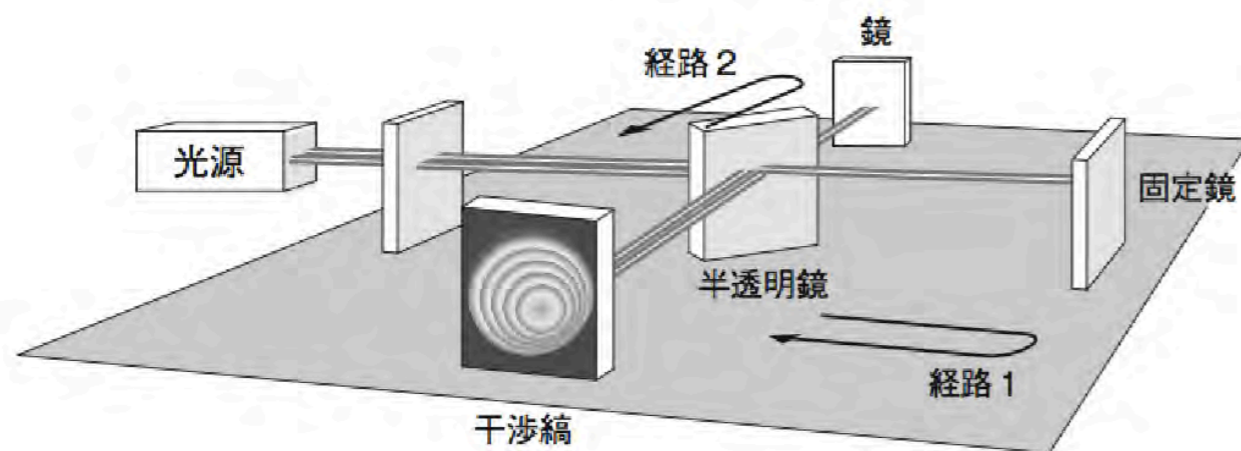
NCSA-AEI group (1998)

アメリカ, LIGO計画始動 (1992年予算承認)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

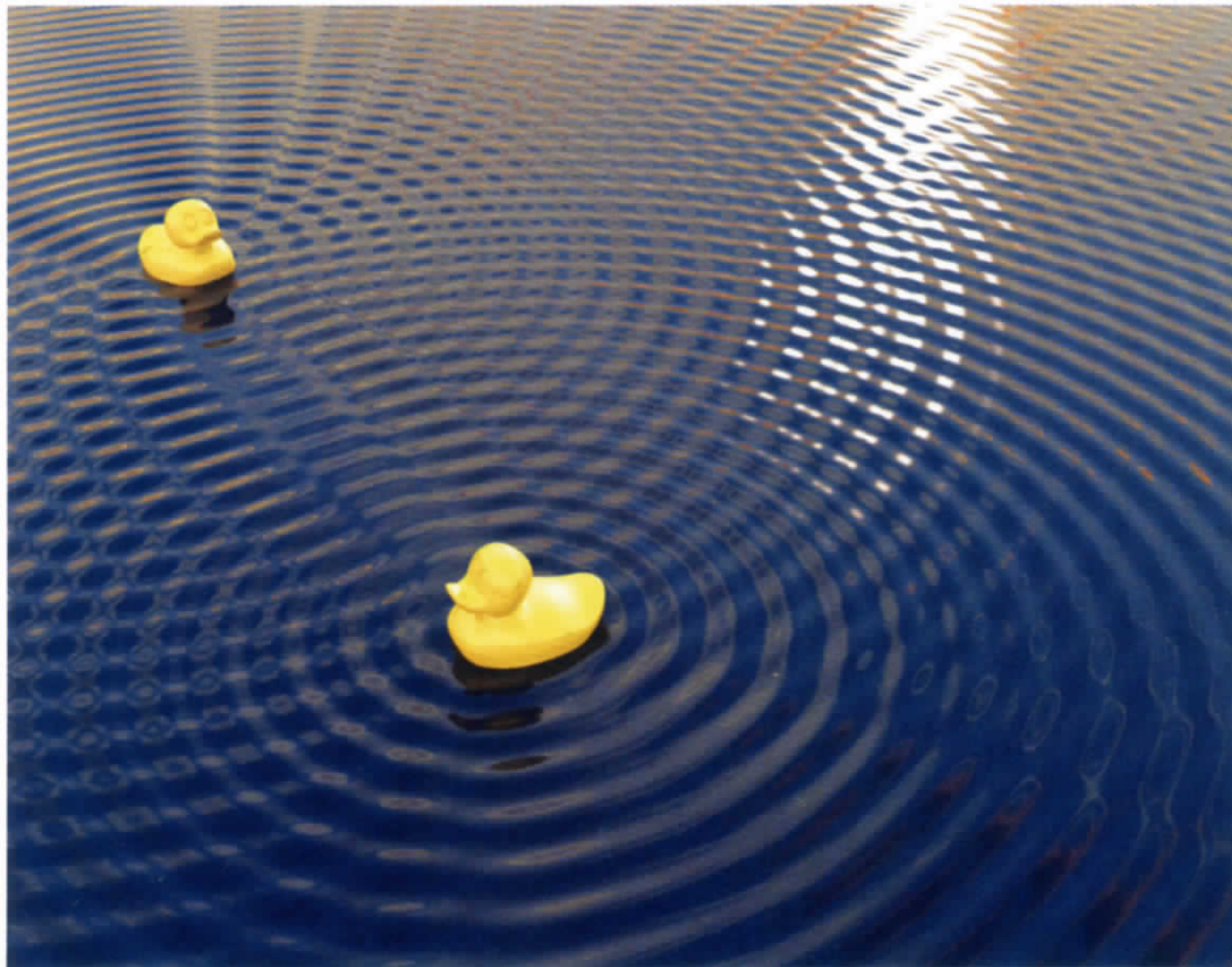


<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



1 辺4kmの腕を2本もつレーザー干渉計 2つ

波の干渉



Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

波は重ね合わせで強くなったり弱くなったり

波の特徴：重ね合わせと干渉

- 2つの波が重なるときは、**重ね合わせの原理**が成り立つ。
- 波が足し合わされると、振幅が大きくなる箇所と小さくなる箇所が発生する。

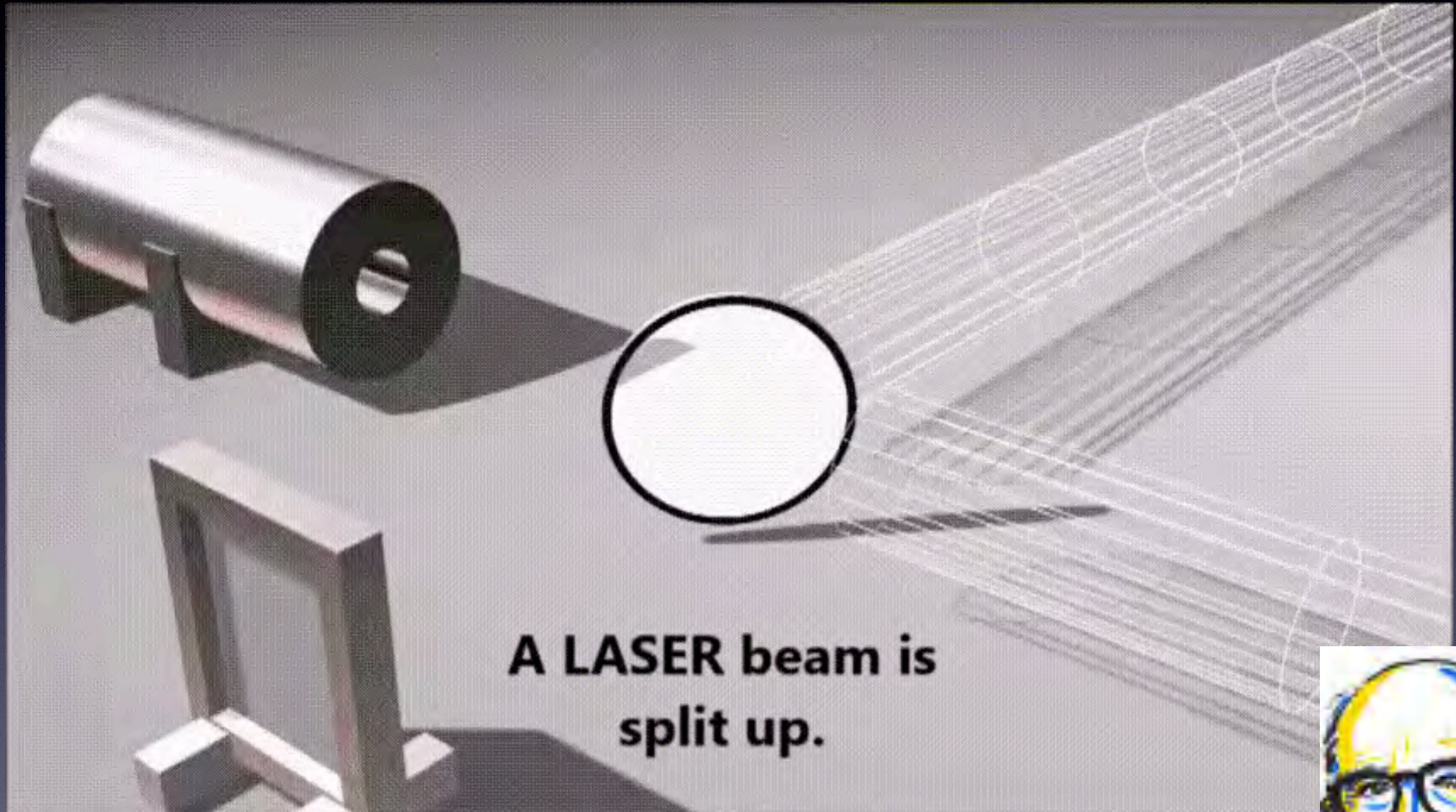
山+山=強め合う, 山+谷=弱め合う

このように、互いに強めあったり弱めあったりする現象を**干渉**という。

山と山の重ねあわせ

山と谷の重ねあわせ

レーザー干渉計による重力波検出のしくみ

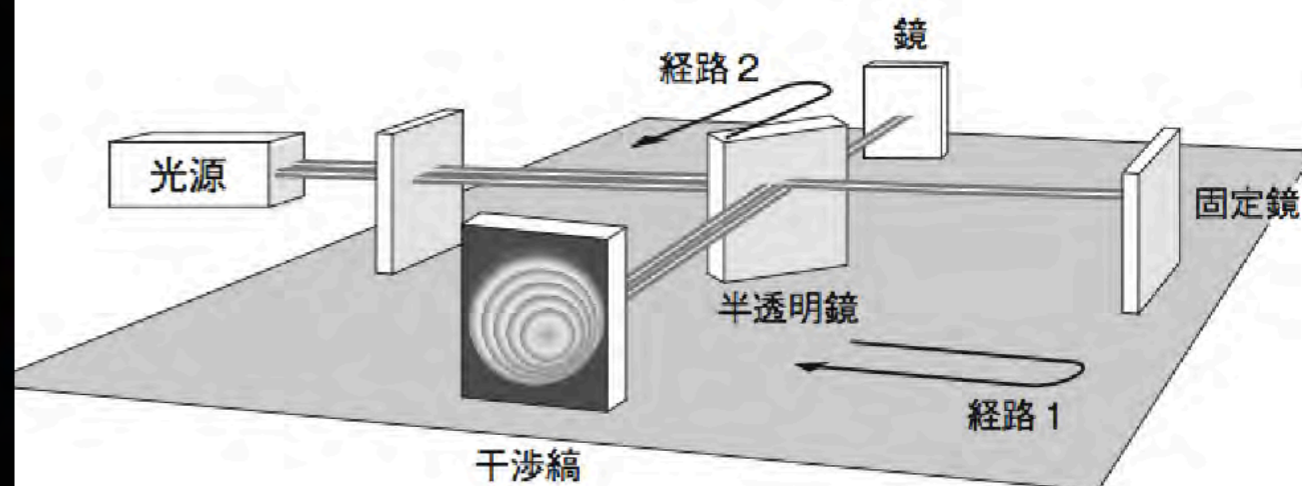
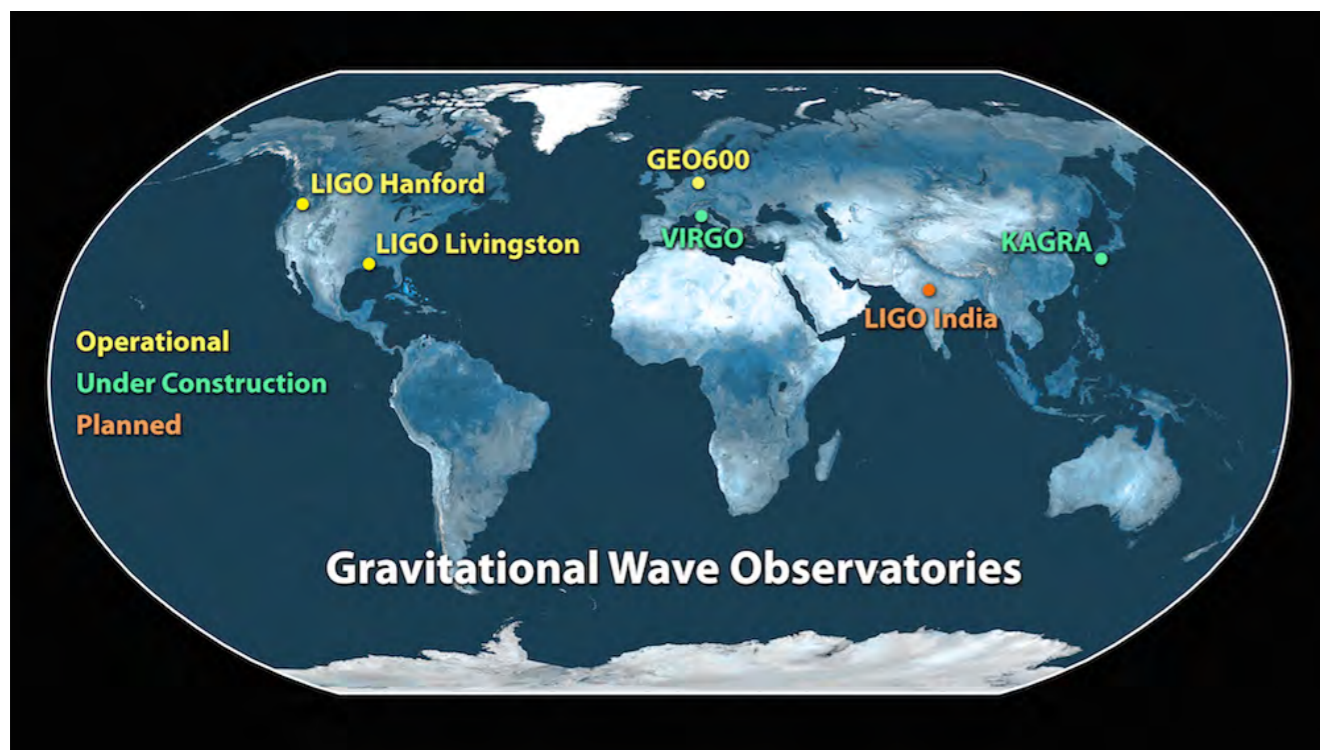


アメリカ, LIGO計画始動 (1992年予算承認)

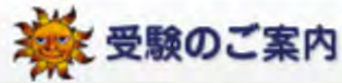
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



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



天文学検定



[ホーム](#) > 2014年度 第4回天文学検定 解答速報

● 解答速報

 2014年度 第4回天文学検定 解答速報

1級

[問題と解答](#)

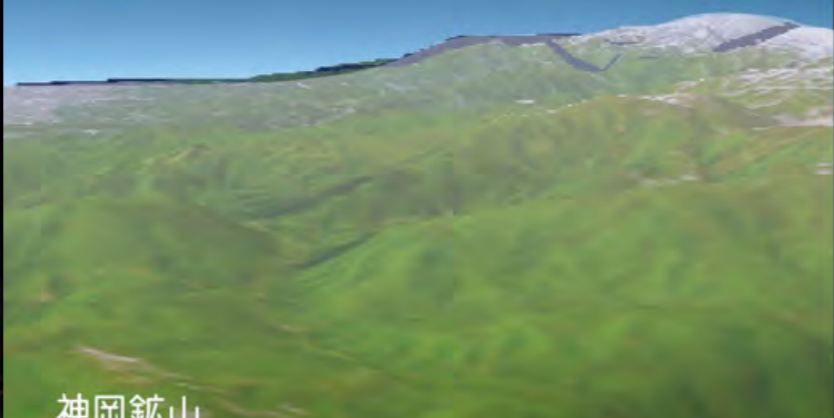
2014年6月、日本が岐阜県に建設している重力波干渉計KAGRA（かぐら）のトンネルが貫通し、マスコミに公開された。KAGRAは、一辺が3kmもあるレーザー干渉計だが、岐阜県神岡鉱山跡の山中にわざわざ建設した理由は何か。

- ① 近くにはスーパーカミオカンデというニュートリノ観測装置があり、実験装置の調整にニュートリノを使うから
- ② 山の中だと地面の振動が少なく、干渉計装置のゆれを押さえることができるから
- ③ 山の中だと温度調整が少なくて済むので、レーザー光源のメンテナンスに都合がよいから
- ④ 強力なレーザー光の発生や、真空ポンプの稼働で、騒音が激しいから

KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

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

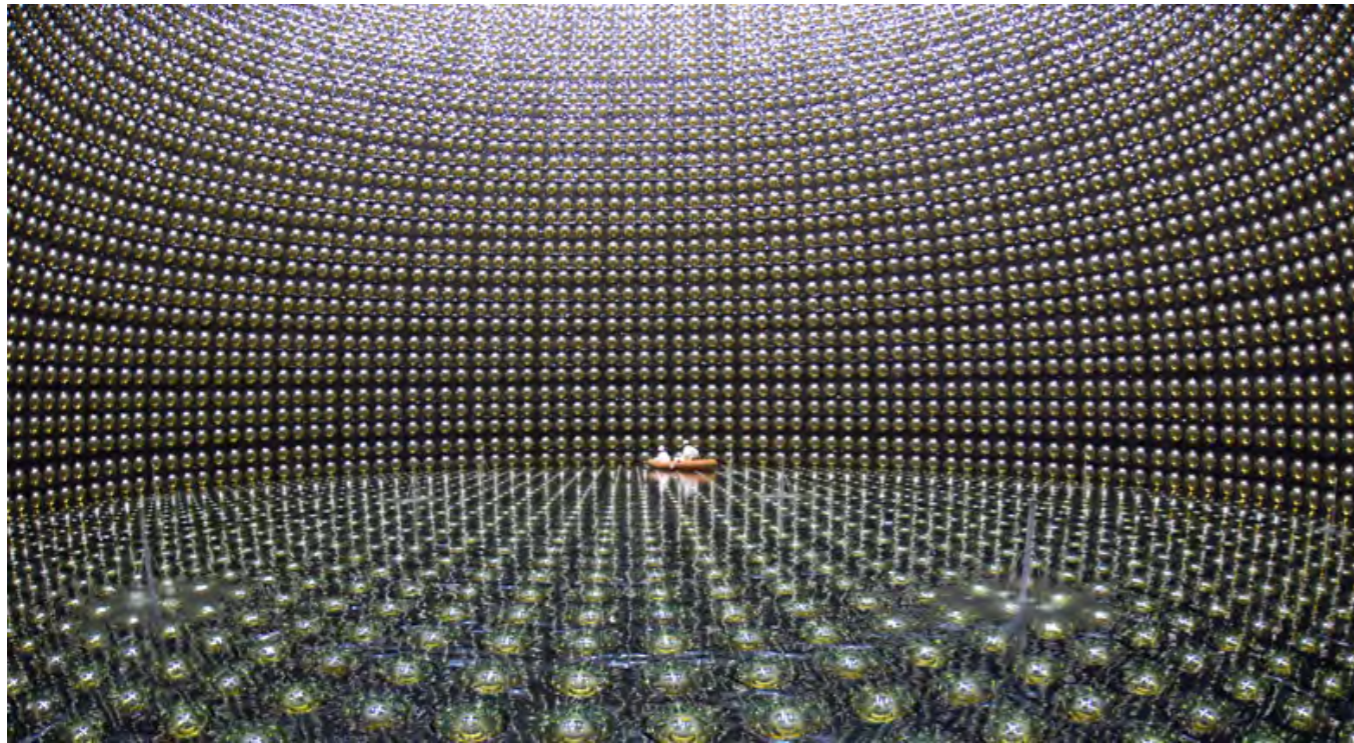
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

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

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

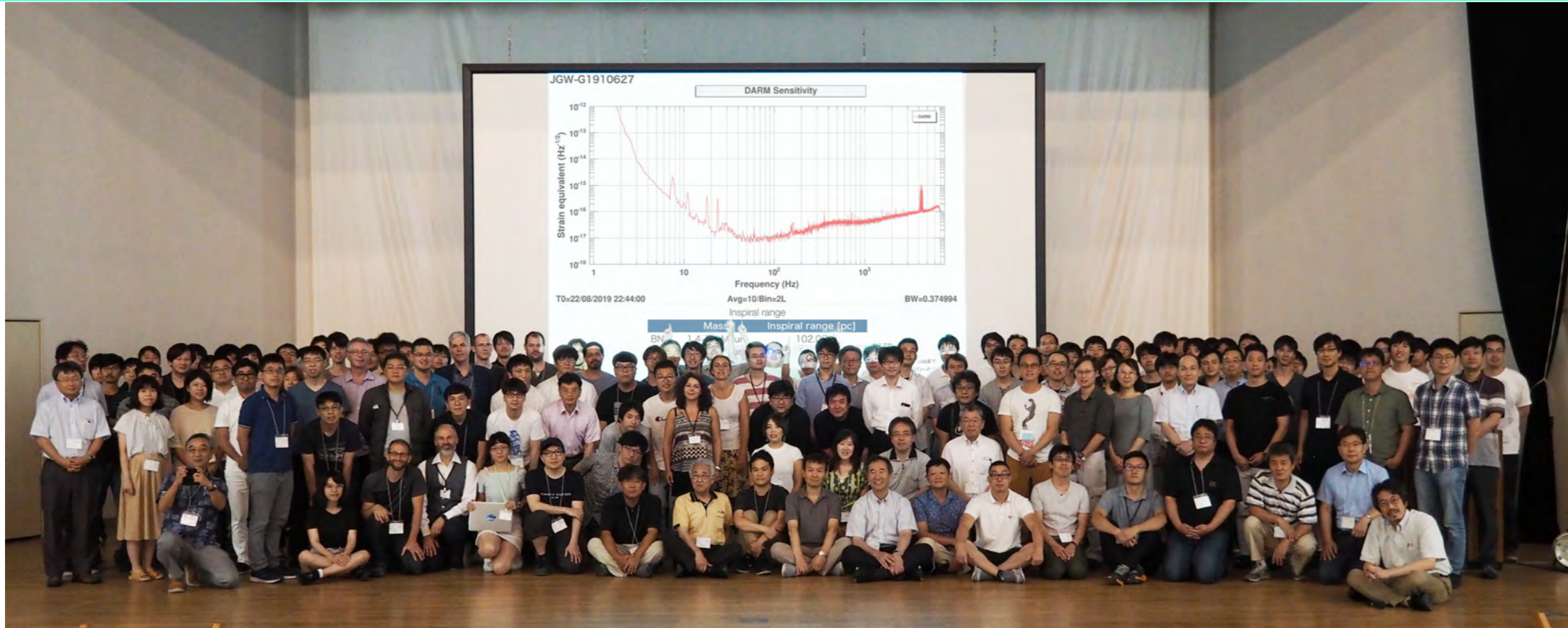
小柴昌俊 (2002年)



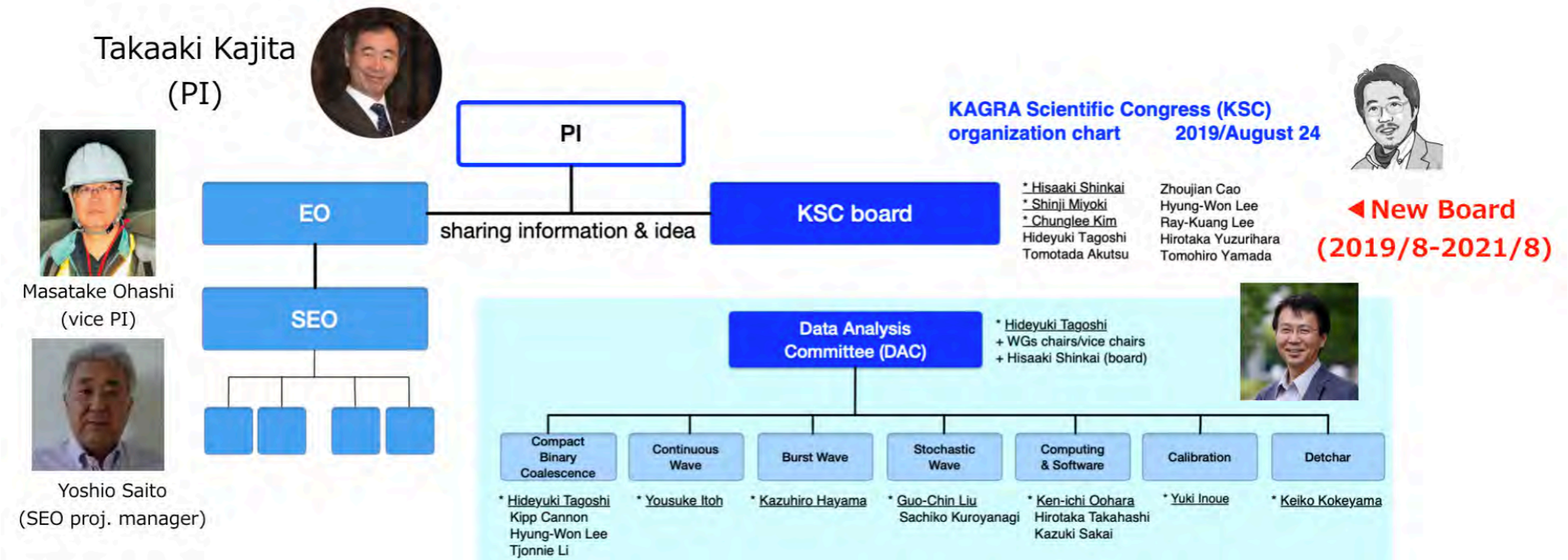
梶田隆章 (2015年)



KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)



2019年8月富山にて, KAGRA Face-to-Face meeting



重力波観測ネットワーク

来週, 10月4日に, 共同観測MoAに調印することになりました.

VIRGO



Jo van den Brand

KAGRA



梶田隆章

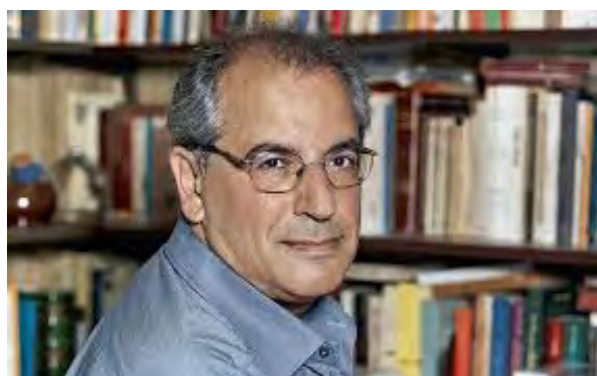
LIGO



Albert Lazzarini



Patrick Brady



Stavros Katsanevas



真貝



David Reitze

重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

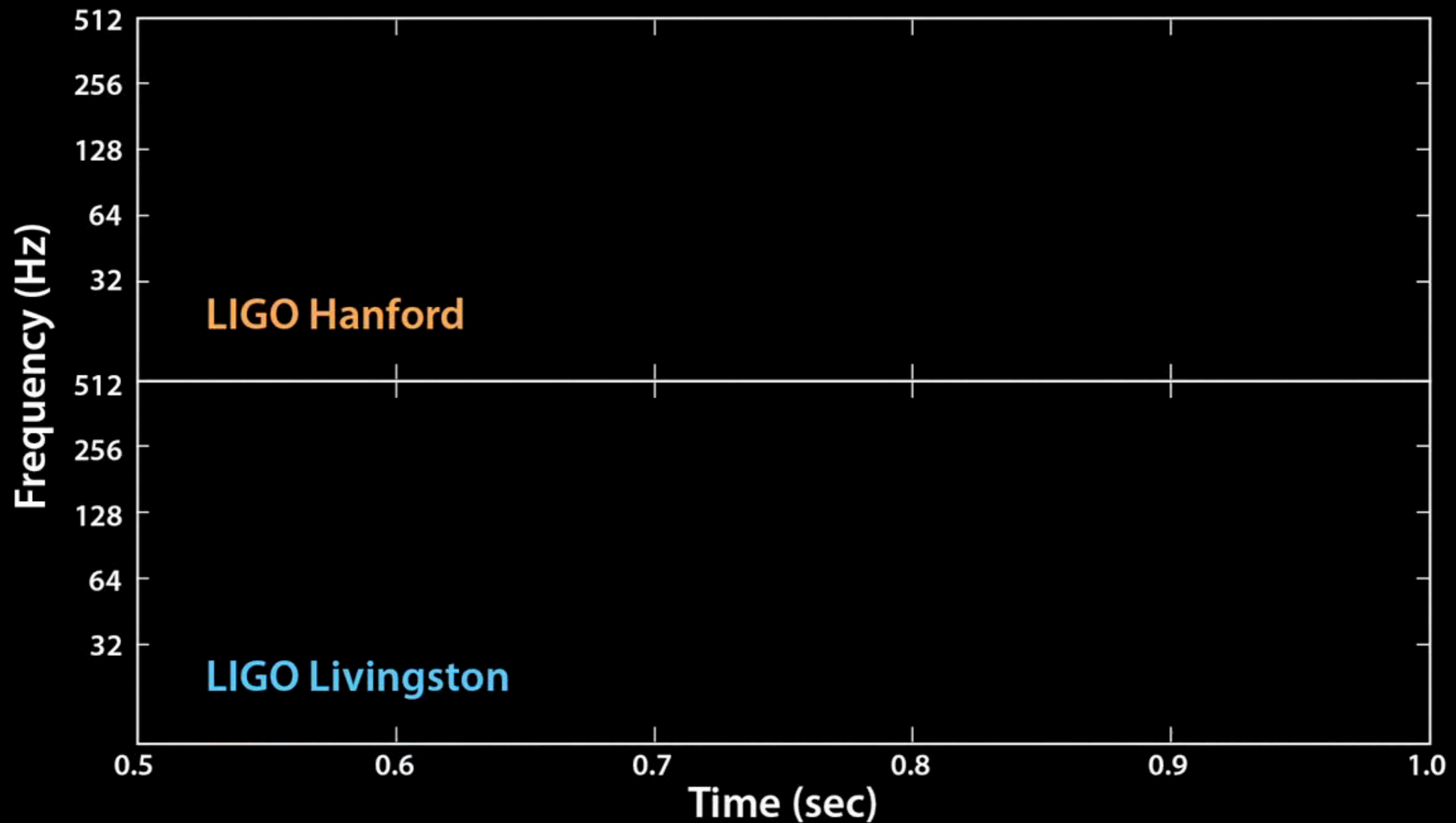


“We had detected gravitational waves. We did it.”

“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>

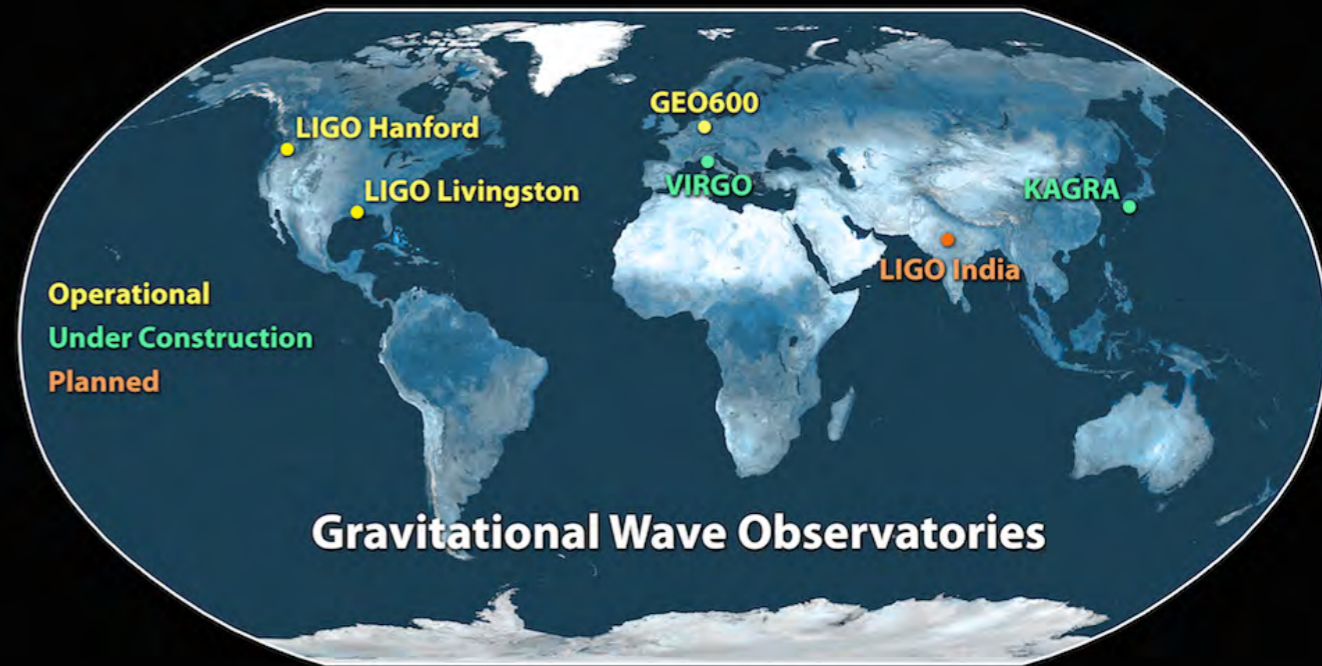
重力波波形を音にすると. . .



始め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

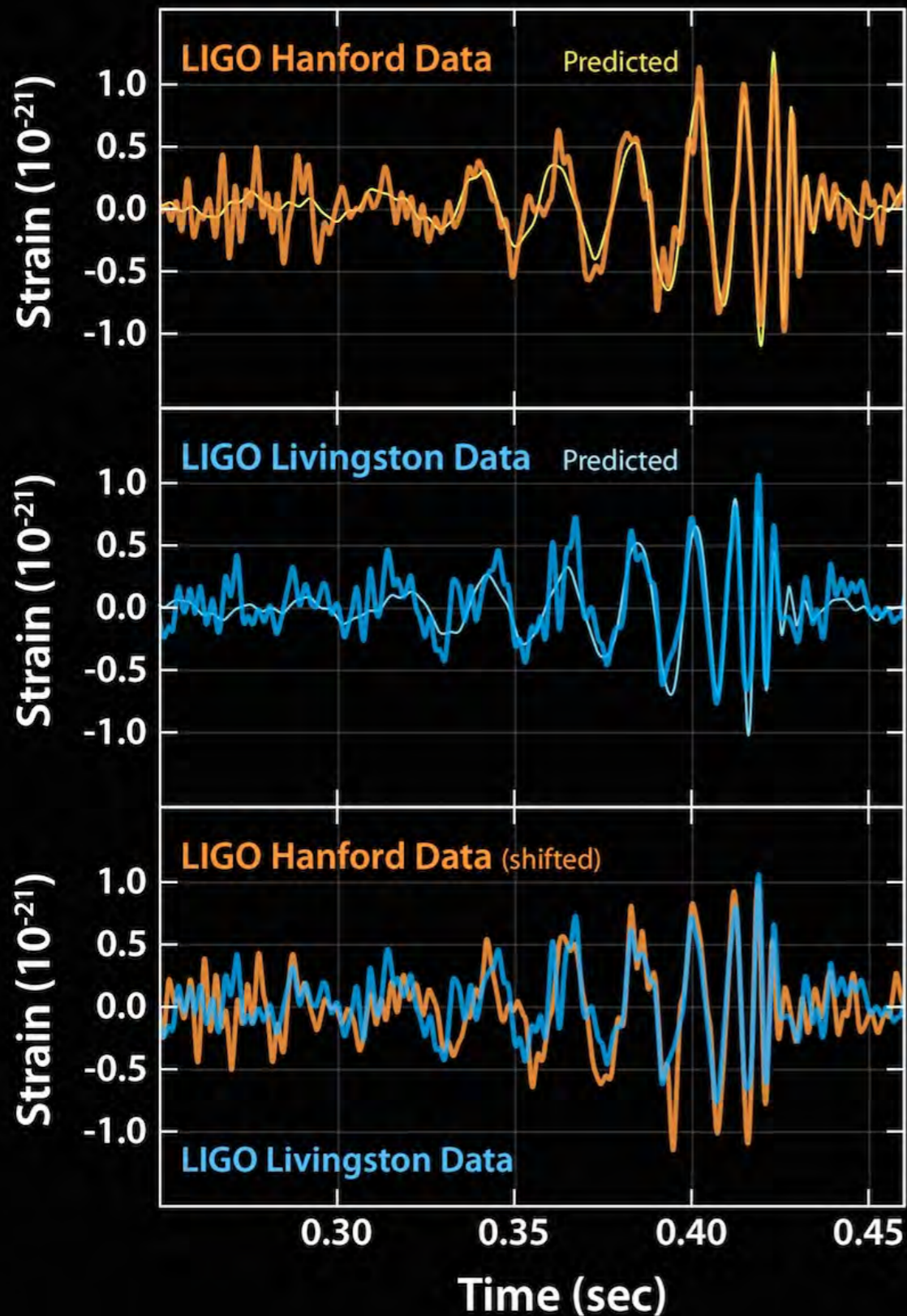


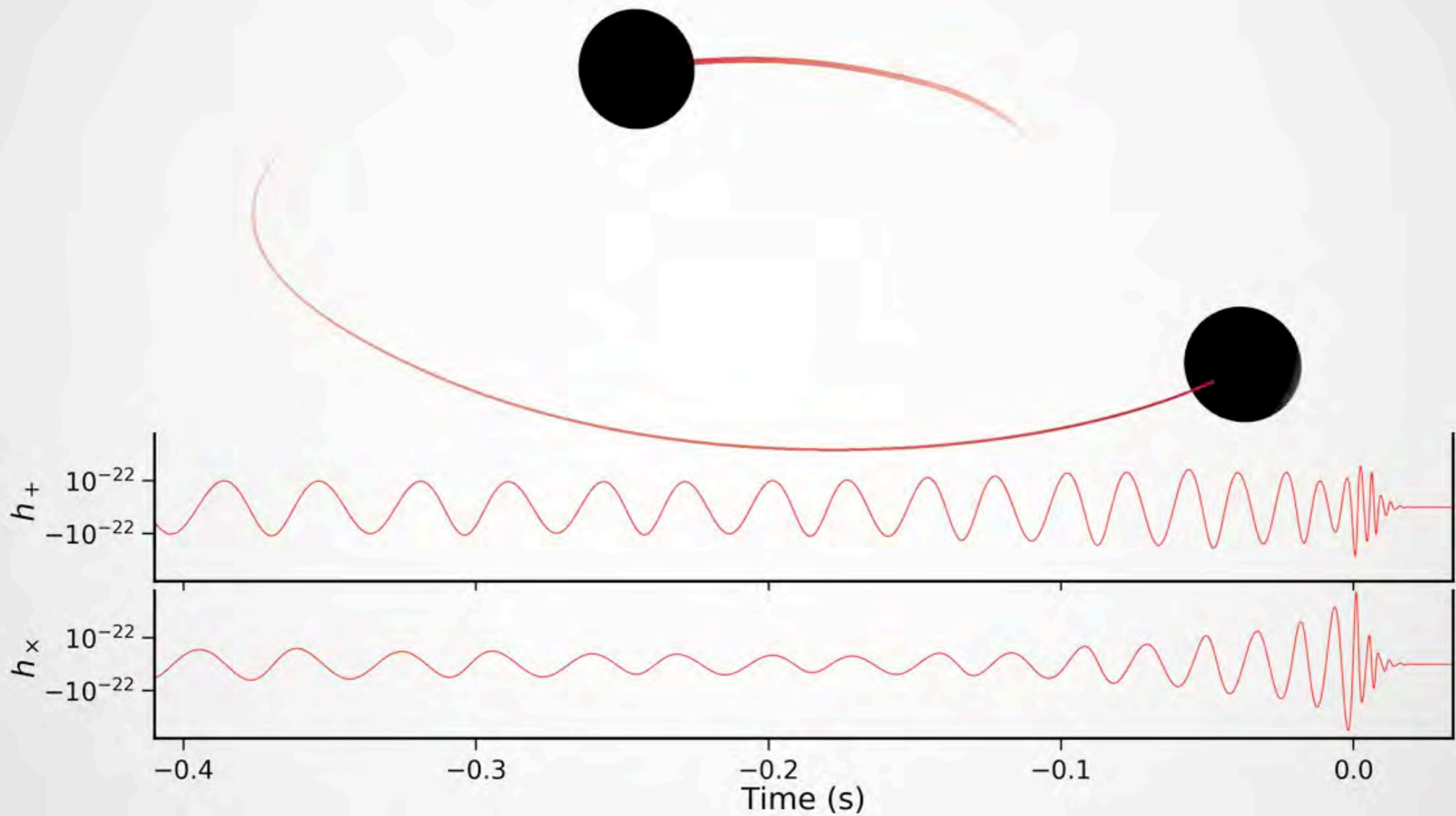
太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

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>

<http://ligo.org/detections/GW170104.php>

36Msun + 29 Msun
 のBHが合体して 62 Msun
 (3 Msun分の質量が消失)

13億光年先
 (400±170 Mpc)
 (z=0.054—0.136)

重力波が検出された！
 重力波が検出できた！
 BHが存在した！
 BH連星が存在した！
 相対論が第0近似として正しい！

GW150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	±0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses M _⊙		remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds.
 Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

2016年(平成28年)2月12日(金曜日) 12版 総合 2

宇宙の謎解き 国際競争

「予想通りで驚いた」 —重力波初観測の報道に接して

真貝 寿明

重力波はアインシュタインが残した百年来の宿題だ。その答えはブラックホールの謎解きにもつながる。日欧米では高精度の大型装置(重力波望遠鏡)をつくらせて検出を狙ってきた。

本年(二〇一六年)は、アインシュタインが一般相対性理論の本論文を発表してちょうど一〇〇年になる。その一〇〇年を祝うかのように、二月二日深夜(米国時間一日)、アメリカのLIGO(ライゴ、注1)のグループは、ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した、と発表した。重力波は、一般相対性理論が予言する物理現象だが、一世紀を経て、ようやく直接観測されたことになる。

私は、一般相対性理論の理論研究に関わって四半世紀になる。これまで重力波を研究の中心に据えてきたわけではないが、この瞬間を待ち望んでいた一人

重力波はアインシュタインが残した百年来の宿題だ。その答えはブラックホールの謎解きにもつながる。日欧米では高精度の大型装置(重力波望遠鏡)をつくらせて検出を狙ってきた。

実験チームの二つの望遠鏡

ナダ

州

ワシントン

イジアナ州

500m

LIGO提供

重力波 初の直接観測

「研究者勇気づけた」

大阪市大院・神田教授 学生らに解説

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらおう狙い。学生ら約100人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【島山哲郎】

神田教授は、岐阜県飛騨市の大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」のプロジェクトでもデータ管理グループのリーダーを務める。説明会では観測されたデータの見方などを解説し「我々にとっても勇気づけられるものだった」と語った。発表を受けて、研究室の学生

が締め切り間際の論文を慌てて書き換えたエピソードを披露すると、会場は笑いに包まれた。

同大大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(23)は「重力波だけでなく、ブラックホールも直接観測したことになると分かり、ためになった」と話していた。

重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさざ波のように宇宙空間に伝わる現象。物理学者のアインシュタインが「一般相対性理論」で存在を予言し、世界中の研究者が観測に挑戦していた。

三行で!

1. 一般相対性理論から重力波の存在が予言された。
2. ブラックホールが衝突・合体して重力波を発生させた。
3. 重力波の検出が実現された。



重力波観測について解説する大阪市立大学大学院理学研究科の神田展行教授—大阪市住吉区で、川平愛撮影

大阪工大「予想通りで驚いた」
真貝教授

大阪工業大情報科学部の真貝寿明教授(一般相対性理論)は「祝・重力波の直接検出」と題して、研究室のウェブページに一般向けの緊急解説記事を掲載した。昨年には一般向けの解説書「ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の100年と展開」を出版している。「こんなにも予想通りのものが見つかるのかと驚いた。素晴らしい発見だ」と感想を語った。今後の研究については「日本でもKAGRAを使い、改めて重力波を確認したり、海外のチームと協力して重力波がどこから来たものなのかを調べたりしていくことが重要だ」と話した。

【島山哲郎】

第1問 次の文章は、二〇〇二年に刊行された科学論の一節である。これを読んで、後の問い(問1～6)に答えよ。なお、設問の都合で本文の段落に①～⑬の番号を付してある。また、表記を一部改めている。(配点 50)

① 現代社会は科学技術に依存した社会である。近代科学の成立期とされる十六世紀、十七世紀においては、そもそも「科学」という名称で認知されるような知的活動は存在せず、伝統的な自然哲学の一環としての、一部の好事家による楽しみの側面が強かった。しかし、十九世紀になると、科学研究は「科学者」という職業的専門家によって各種高等教育機関で営まれる知識生産へと変容し始める。既存の知識の改訂と拡大のみを生業とする集団を社会に組み込むことになったのである。さらに二十世紀になり、国民国家の競争の時代になると、科学は技術的な威力と結びつくことによって、この競争の重要な戦力としての力を発揮し始める。二度にわたる世界大戦が科学―技術の社会における位置づけを決定的にしていったのである。

② 第二次世界大戦以後、科学技術という営みの存在は膨張を続ける。ブライスによれば、科学技術という営みは十七世紀以来、十五年で(ア)バイソウするという速度で膨張してきており、二十世紀後半の科学技術の存在はGNPの二パーセント強の投資を要求するまでになってきているのである。現代の科学技術は、かつてのような思弁的、宇宙論的伝統に基づく自然哲学的性格を失い、A 先進国の社会体制を維持する重要な装置となってきた。

③ 十九世紀から二十世紀前半にかけては科学という営みの規模は小さく、にもかかわらず技術と結びつき始めた科学―技術は社会の諸問題を解決する能力を持っていた。「もつと科学を」というスローガンが説得力を持ち得た所以である。しかし二十世紀後半の科学―技術は両面価値的存在になり始める。現代の科学―技術では、自然の仕組みを解明し、宇宙を説明するという営みの比重が下がり、実験室の中に天然では生じない条件を作り出し、そのもとでさまざまな人工物を作り出すなど、自然に介入し、操作する能力の開発に重点が移動している。その結果、永らく人類を脅かし苦しめてきた病や災害といった自然の脅威を制御できるようになってきたが、同時に、科学―技術の作り出した人工物が人類にさまざまな災いをもたらし始めてもいるのである。科学―技術が恐るべき速度で生み出す新知識が、われわれの日々の生活に商品や製品として放出されてくる。い

わゆる「環境ホルモン」や地球環境問題、先端医療、情報技術などがその例である。B こうして「もつと科学を」というスローガンの説得力は低下し始め、「科学が問題ではないか」という新たな意識が社会に生まれ始めているのである。

④ しかし、科学者は依然として「もつと科学を」という発想になじんでおり、このような「科学が問題ではないか」という問いかけを、科学に対する無知や誤解から生まれた情緒的反発とみなしがちである。ここからは、素人の一般市民への科学教育の充実や、科学啓蒙プログラムの展開という発想しか生まれないのである。

⑤ このような状況に一石を投じたのが科学社会学者のコリンズとピンチの『ゴレム』である。ゴレムとはユダヤの神話に登場する怪物である。人間が水と土から創り出した怪物で、魔術的力を備え、日々その力を増加させつつ成長する。人間の命令に従い、人間の代わりに仕事をし、外敵から守ってくれる。しかしこの怪物は不器用で危険な存在でもあり、適切に制御しなければ主人を破壊する威力を持っている。コリンズとピンチは、現代では、科学が、全面的に善なる存在か全面的に悪なる存在かのどちらかのイメージに引き裂かれているという。そして、このような分裂したイメージを生んだ理由は、科学が実在と直結した無謬の知識という神のイメージで捉えられてきており、科学が自らを実態以上に美化することによって過大な約束をし、それが必ずしも実現しないことが幻滅を生み出したからだという。つまり、全面的に善なる存在というイメージが科学者から振りまかれ、他方、チエルノブイリ事故や狂牛病に象徴されるような事件によって科学への幻滅が生じ、一転して全面的に悪なる存在というイメージに変わったというのである。

⑥ コリンズとピンチの処方箋は、科学者が振りまいた当初の「実在と直結した無謬の知識という神のイメージ」を科学の実態に即した「不確実で失敗しがちな向こう見ずでへまをする巨人のイメージ」、つまりC ゴレムのイメージに取りかえることを主張したのである。そして、科学史から七つの具体的な実験をめぐる論争を取り上げ、近年の科学社会学研究に基づくケーススタディーを提示し、科学上の論争の終結がおよそ科学哲学者が想定するような論理的、方法論的決着ではなく、さまざまなヨウ(イ)インが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

⑦ 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウエーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を

ウ(イ)ンが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

7 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウエーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を用いて、重力波の測定に成功したと発表した。これをきっかけに、追試をする研究者があらわれ、重力波の存在をめぐって論争となったのである。この論争において、実験はどのような役割を果たしていたかという点が興味深い。追試実験から、ウエーバーの結果を否定するようなデータを手に入れた科学者は、それを発表するかいなかという選択の際に(ウ)ヤツカイな問題を抱え込むのである。否定的な結果を発表することは、ウエーバーの実験が誤りであり、このような大きな値の重力波は存在しないという主張をすることになる。しかし、実は批判者の追試実験の方に不備があり、本当はウエーバーの検出した重力波が存在するということが明らかになれば、この追試実験の結果によって彼は自らの実験能力の低さを公表することになる。

8 学生実験の場合には、実験をする前におおよそどのような結果になるかがわかっており、それと食い違えば実験の失敗がセ(エ)ン(エ)コクされる。しかし現実の科学では必ずしもそうはことが進まない。重力波の場合、どのような結果になれば実験は成功といえるかがわからないのである。重力波が検出されれば、実験は成功なのか、それとも重力波が検出されなければ、実験は成功なのか。しかしまさに争点は、重力波が存在するかどうかであり、そのための実験なのである。何が実験の成功といえる結果なのかを、前もって知ることはできない。重力波が存在するかどうかを知るために、「優れた検出装置を作らなければならぬ。しかし、その装置を使って適切な結果を手に入れなければ、装置が優れたものであったかどうかはわからない。しかし、優れた装置がなければ、何が適切な結果かということはわからない……」。コリンズとピンチはこのような循環を「実験家の悪循環」と呼んでいる。

9 重力波の論争に関しては、このような悪循環が生じ、その存在を完全に否定する実験的研究は不可能であるにもかかわらず(存在、非存在の可能性がある)、結局、有力科学者の否定的発言をきっかけにして、科学者の意見が雪崩を打って否定論に傾き、それ以後、重力波の存在は明確に否定されたのであった。つまり、論理的には重力波の存在もしくは非存在を実験によって決着をつけられていなかったが、科学者共同体の判断は、非存在の方向で収束したということである。

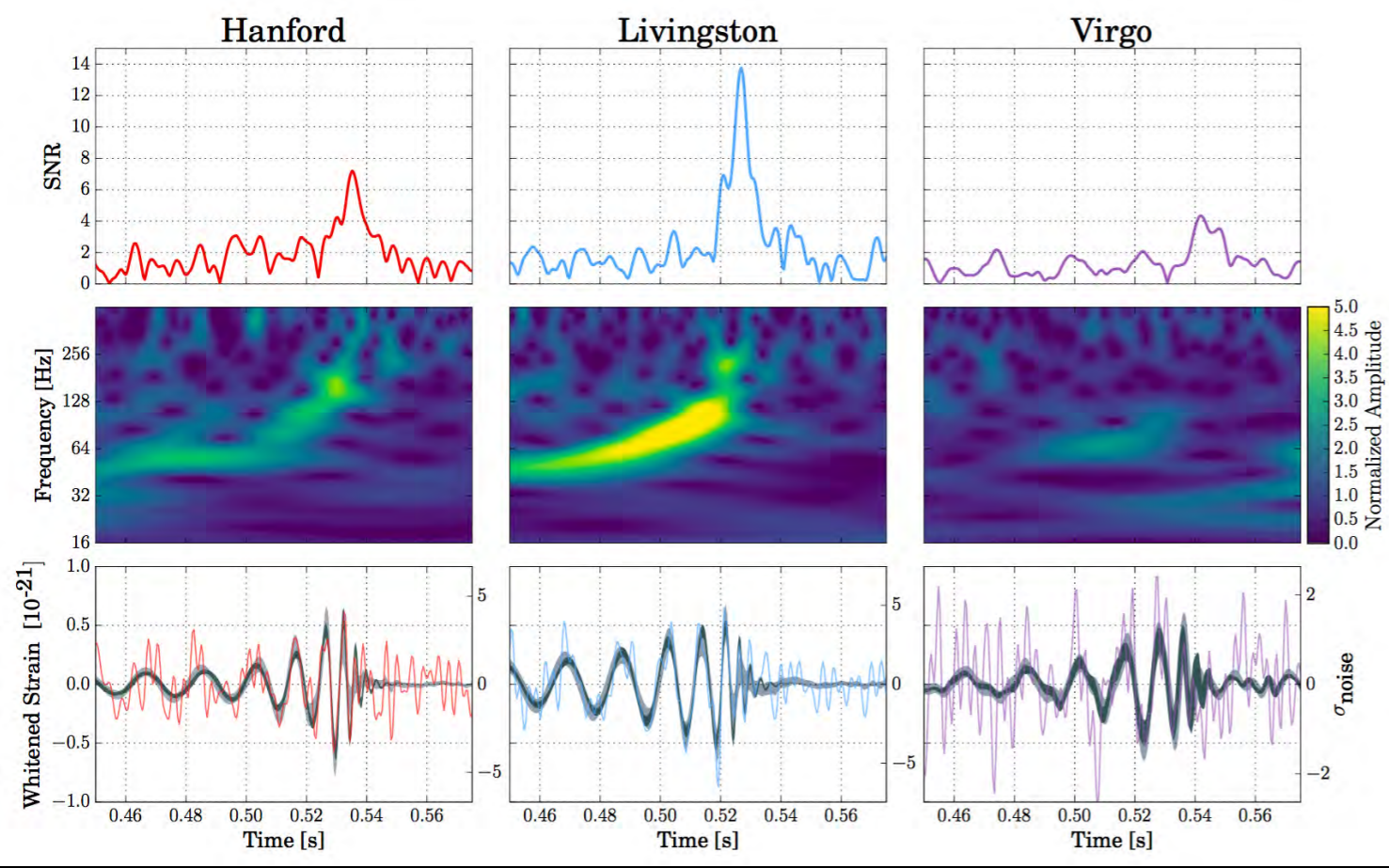
10 コリンズとピンチは、このようなケーススタディーをもとに、「もっと科学を」路線を批判するのである。民主主義国家の一
7 ウエーバー——ジョセフ・ウエーバー(一九一九～二〇〇〇)。物理学者。
8 重力波——時空のゆがみが波となって光速で伝わる現象。一九一六年にアインシュタインがその存在を予言していた。
9 重力波の存在は明確に否定された——ウエーバーによる検出の事実が証明されなかったが、二〇一六年、アメリカの研究チームが直接検出に成功したと発表した。

- (ウ)
- ヤツカイ
- 3
- ⑤ ヤツコウがある野草を探す
- ④ ヤツキになって反対する
- ③ ヤクドシを乗り切る
- ② ツウヤクの資格を取得する
- ① ごりヤクがある

- (エ)
- センコク
- 4
- ⑤ 筆跡がコクジした署名
- ④ コクソウ地帯
- ③ コクビヤクのつけにくい議論
- ② コクメイな描写
- ① 上級裁判所へのジョウウコク

GW170814

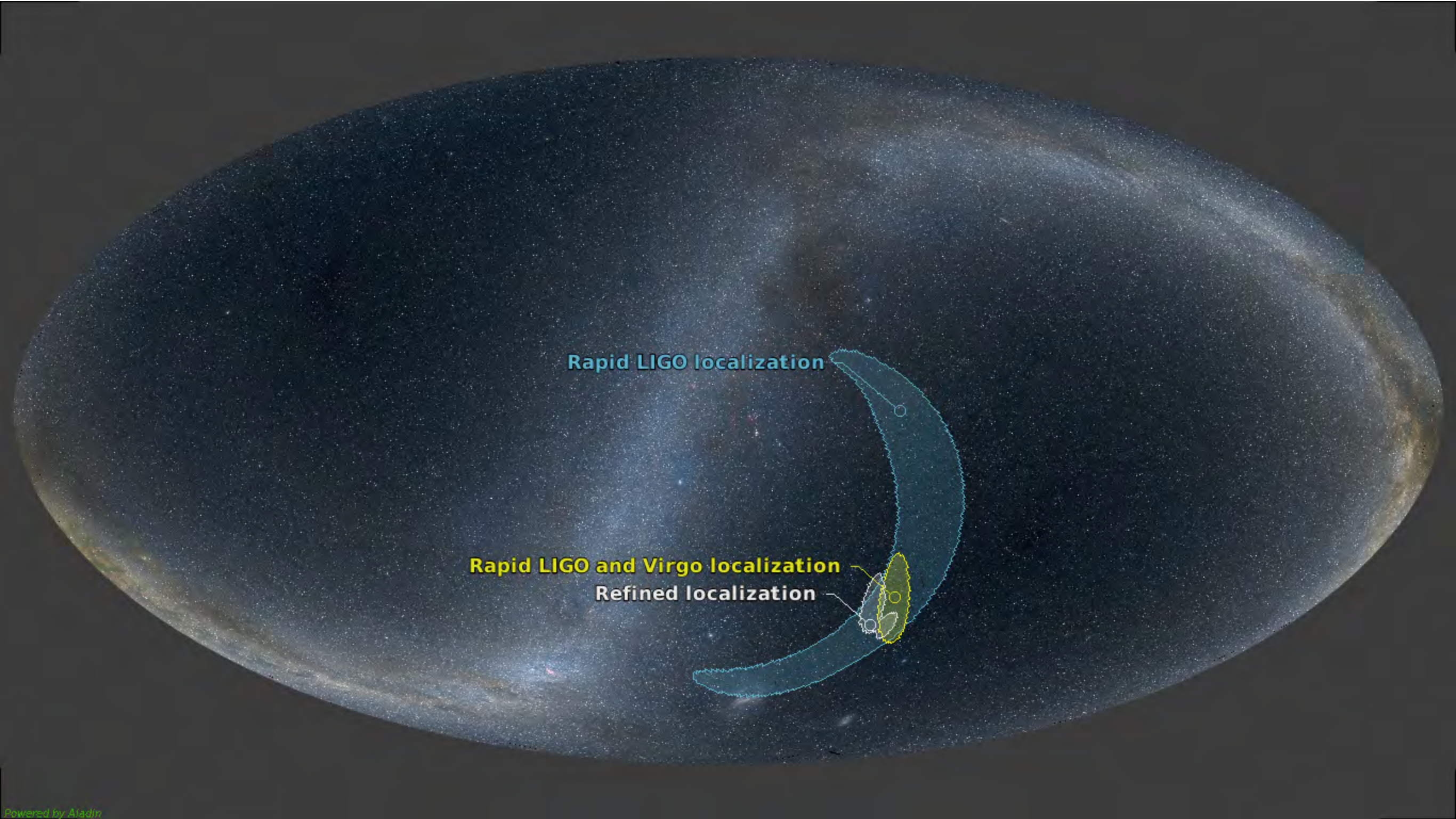
GW170814: FACTSHEET



observed by	H1, L1, V1	duration from 30 Hz	~ 0.26 to 0.28 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 15 to 16
date	14 Aug 2017	credible region sky area (with V1)	60 deg ²
time	10:30:43 UTC	credible region sky area (without V1)	1160 deg ²
online trigger latency	~ 30 s	latitude, longitude (at time of arrival)	45° S, 73° W
signal arrival time delay	at L1 8 ms before H1 and 14 ms before V1	sky location	in direction of Eridanus constellation
signal-to-noise ratio	18	*RA, Dec	03 ^h 11 ^m , -44°57 ^m
false alarm rate	≤ 1 in 27 000 years	Peak GW strain (10 ⁻²²) (H1, L1, V1)	~ 6, 6, 5
probability of noise producing V1 SNR peak	0.3%	peak stretching of interferometer arm (H1, L1, V1)	~ ± 1.2, 1.2, 0.8 am
distance	1.1 to 2.2 billion light-years	frequency at peak GW strain	155 to 203 Hz
redshift	0.07 to 0.14	wavelength at peak GW strain	1480 to 1930 km
total mass	53 to 59 M _⊙	peak GW luminosity	3.2 to 4.2 × 10 ⁵⁶ erg s ⁻¹
primary BH mass	28 to 36 M _⊙	radiated GW energy	2.4 to 3.1 M _⊙ c ²
secondary BH mass	21 to 28 M _⊙	remnant ringdown freq.	312 to 345 Hz
mass ratio	0.6 to 1.0	remnant damping time	3.1 to 3.6 ms
remnant BH mass	51 to 56 M _⊙	consistent with general relativity?	passes all tests performed
remnant BH spin	0.65 to 0.77	evidence for dispersion of GWs	none
remnant size (effective radius)	139 to 153 km		
remnant area	2.4 to 2.9 × 10 ⁵ km ²		
effective spin parameter	-0.06 to 0.18		
effective precession spin parameter	unconstrained		

アメリカ LIGO 2台と、
ヨーロッパ Virgoの3台の
同時観測に成功

Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.
 L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, V1=Virgo, am=attometer=10⁻¹⁸ m, M_⊙=1 solar mass=2 × 10³⁰ kg
 Background Images (H1, L1, V1 from left to right): time-frequency trace (top), sky maps (middle), and time series with reconstructed waveforms from modeled and un-modeled searches (bottom)
 * Maximum a Posteriori estimates



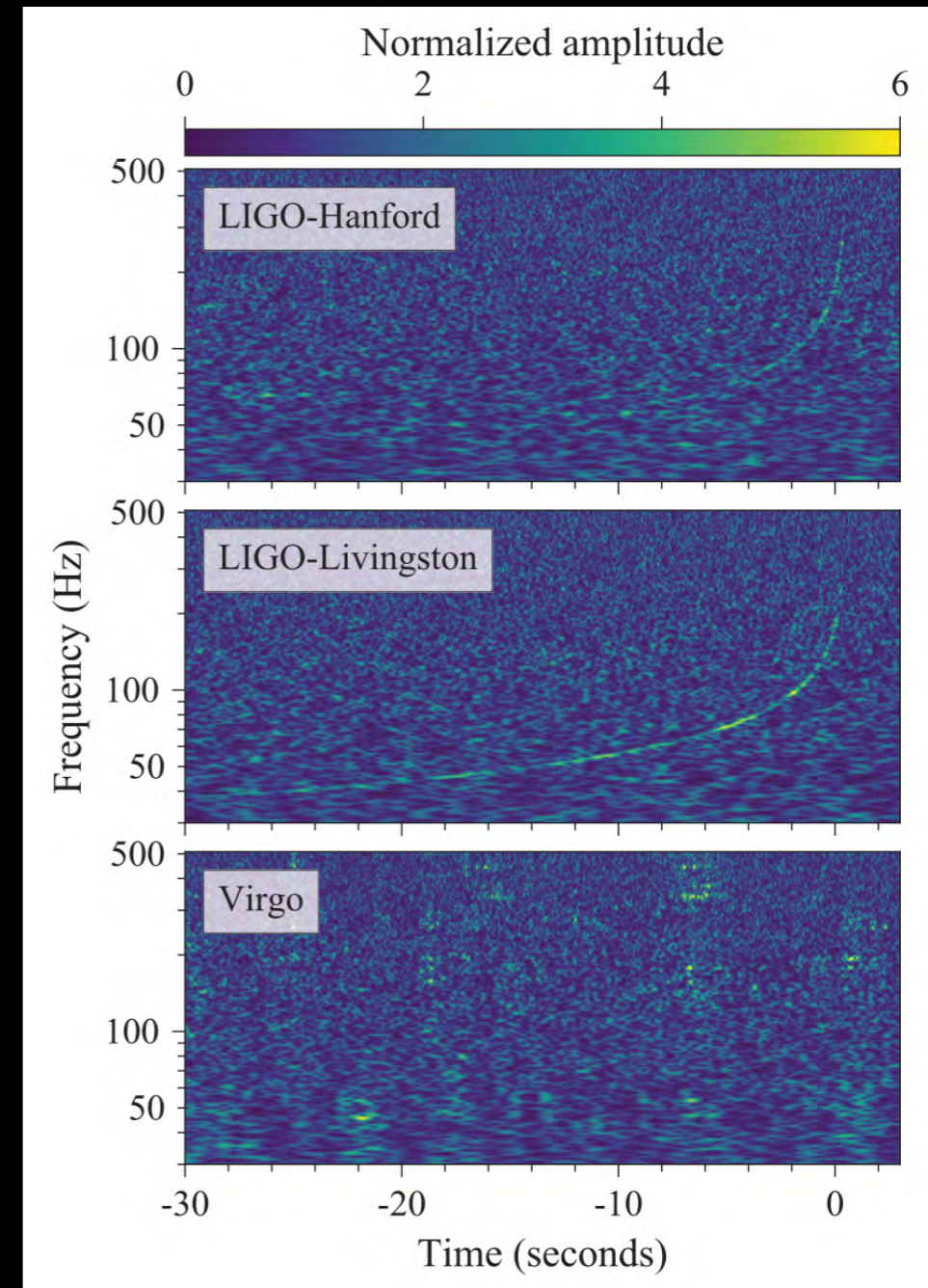
Rapid LIGO localization

Rapid LIGO and Virgo localization

Refined localization

2017年10月, LIGO/Virgoが中性子星連星の合体によって生じた重力波を初めて検出した, と発表した

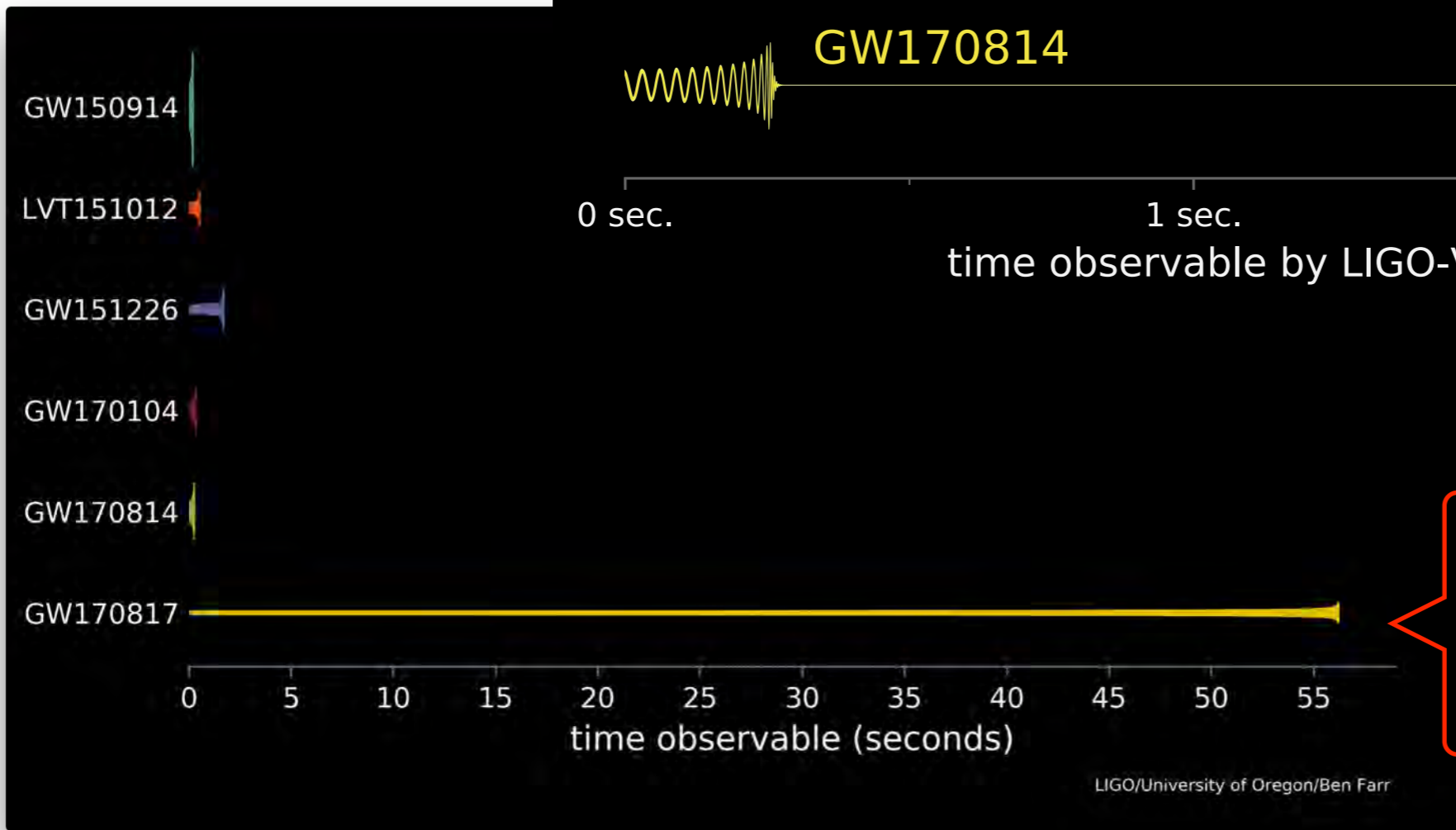
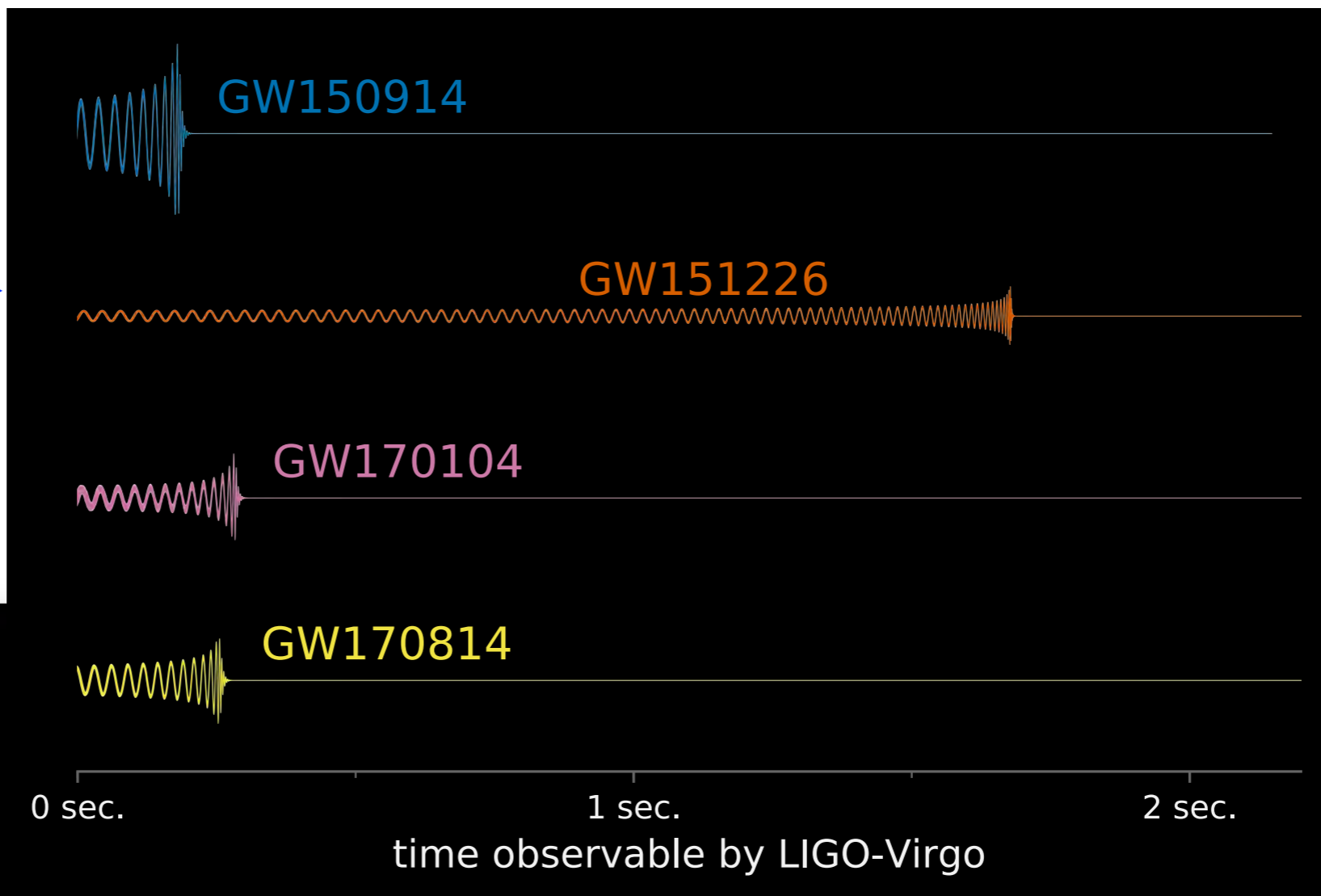
2017年8月17日



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

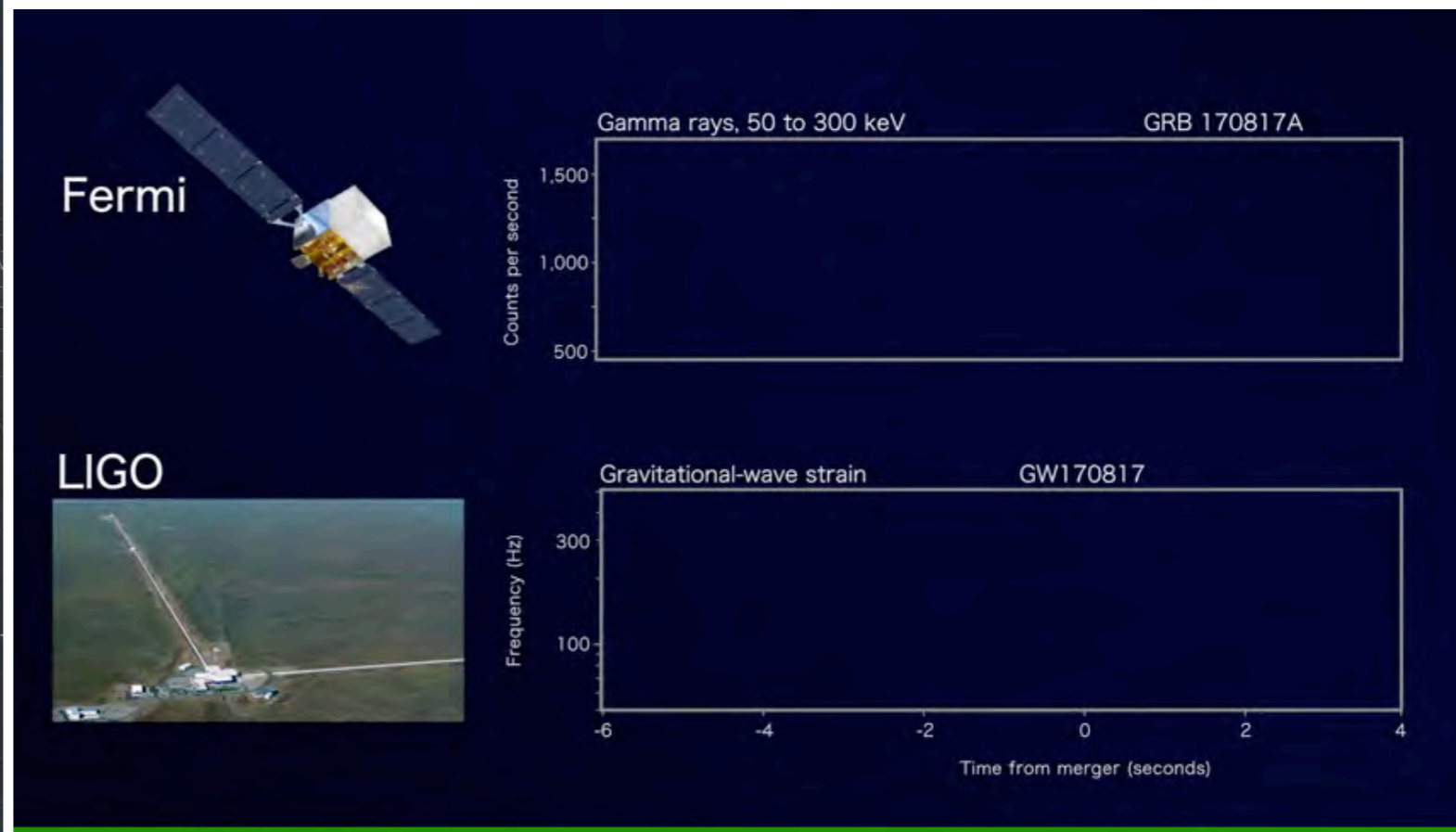
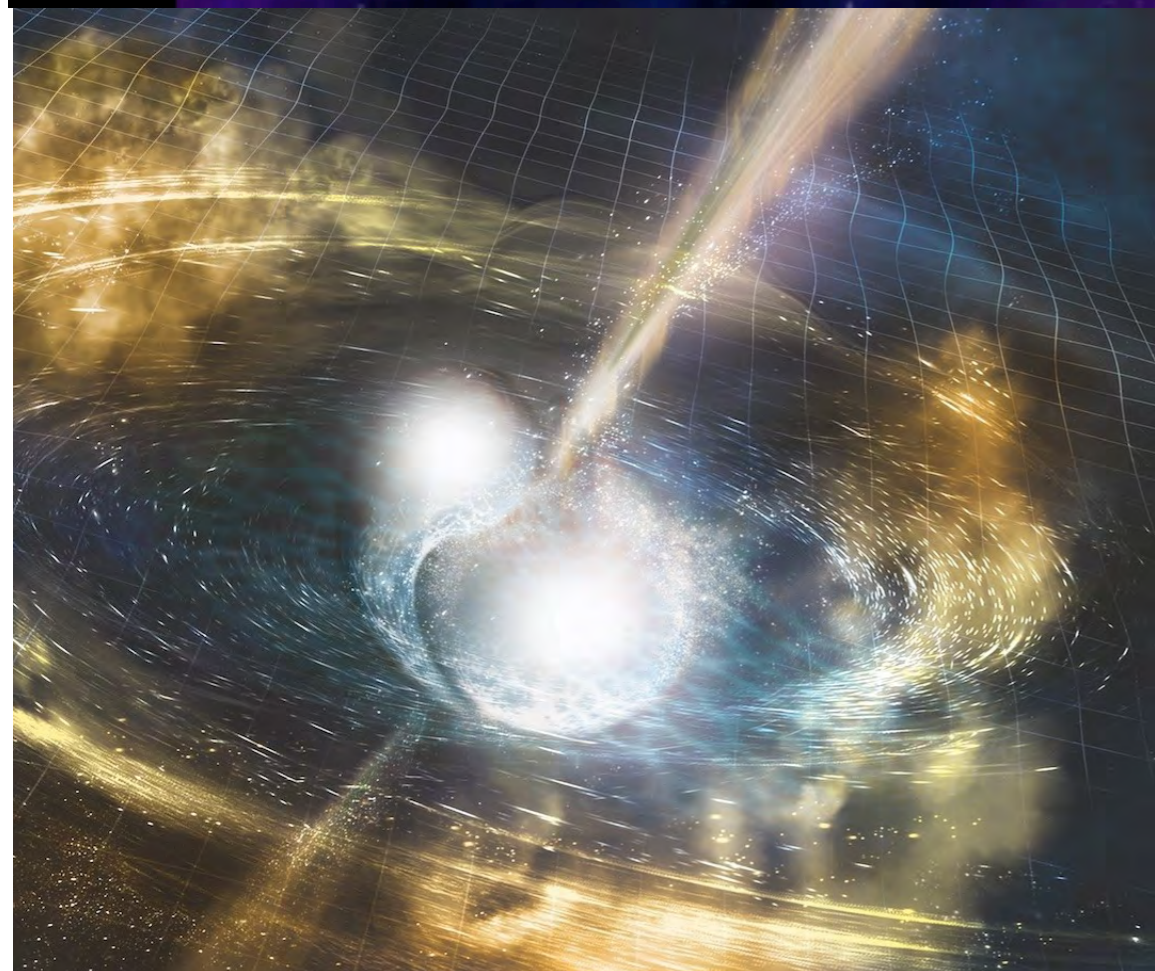
これまでの
BHBH合体
による重力波



今回のNSNS
合体による重力波

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

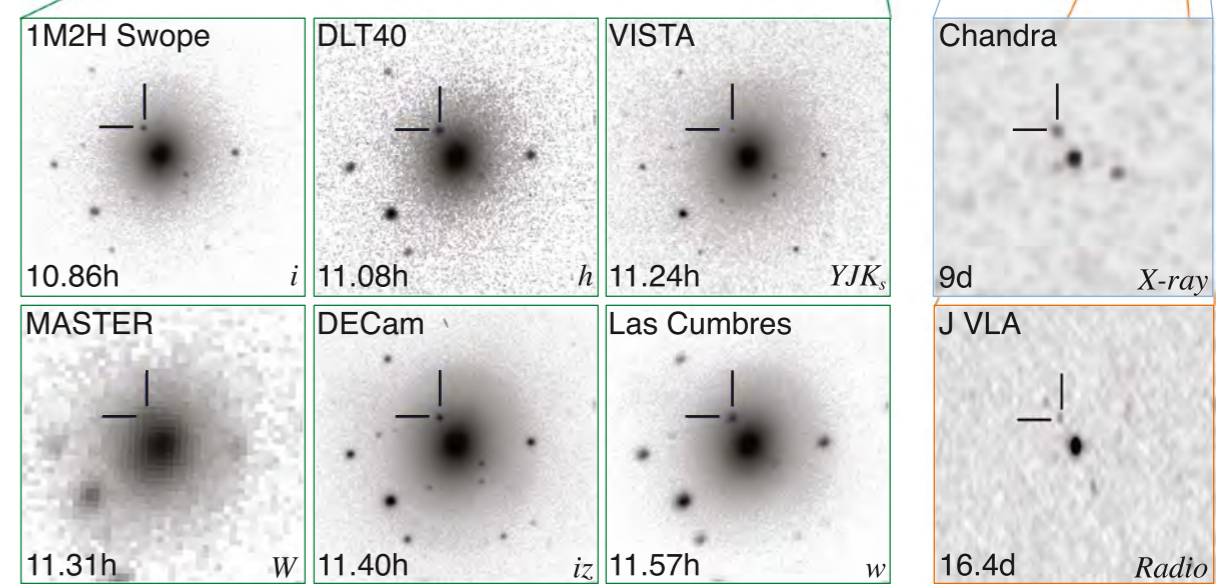
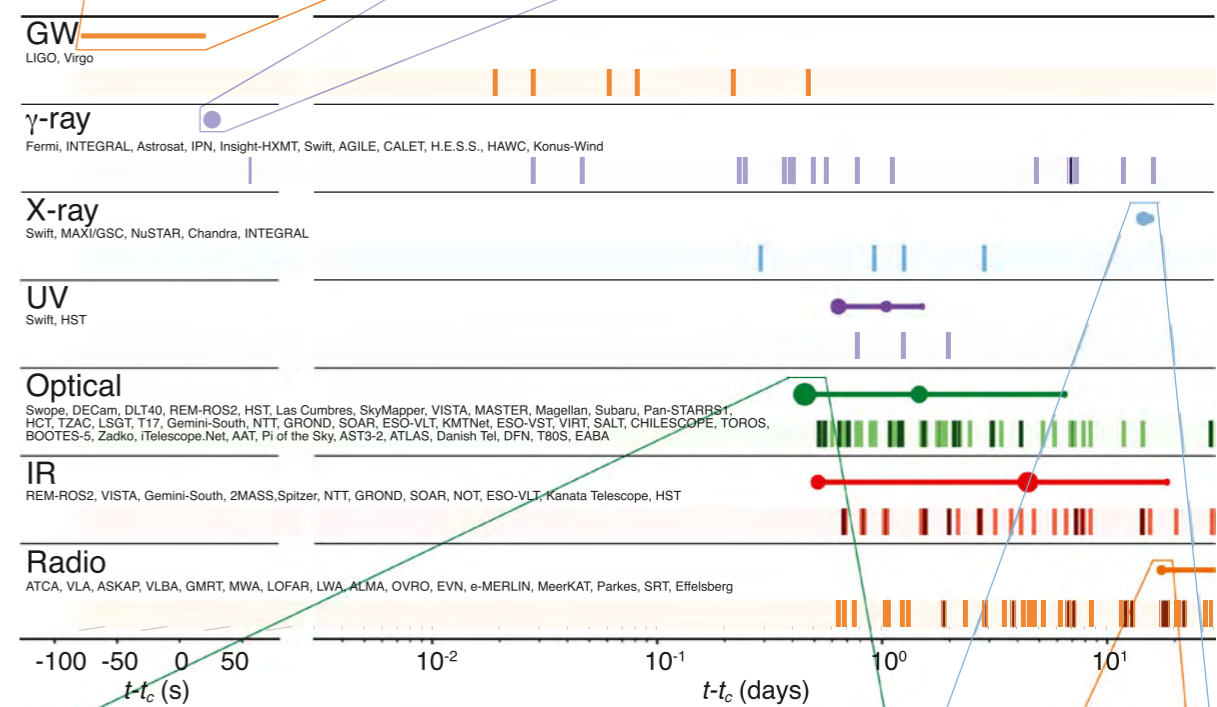
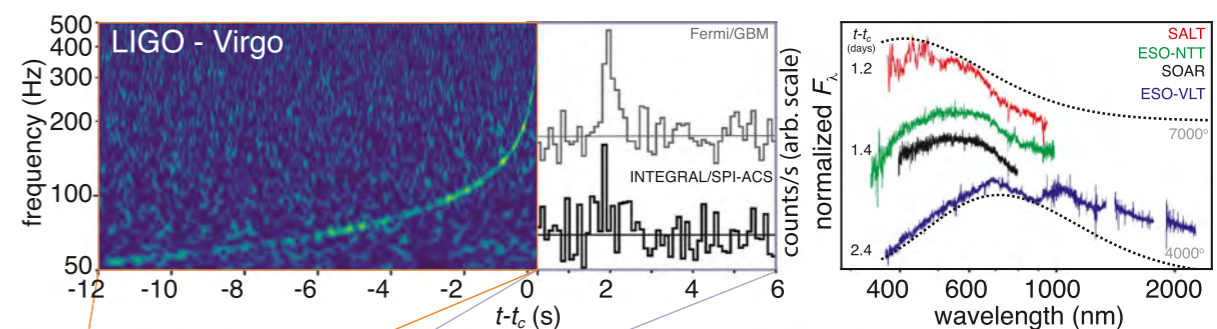
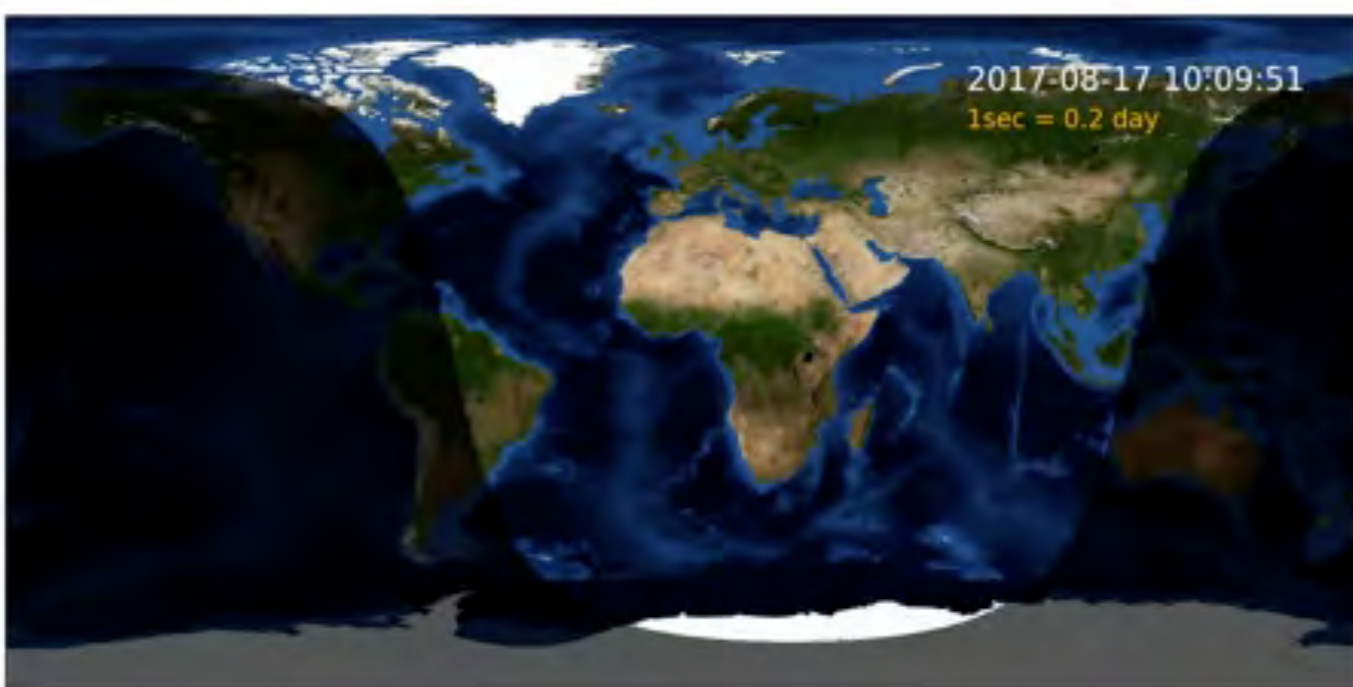
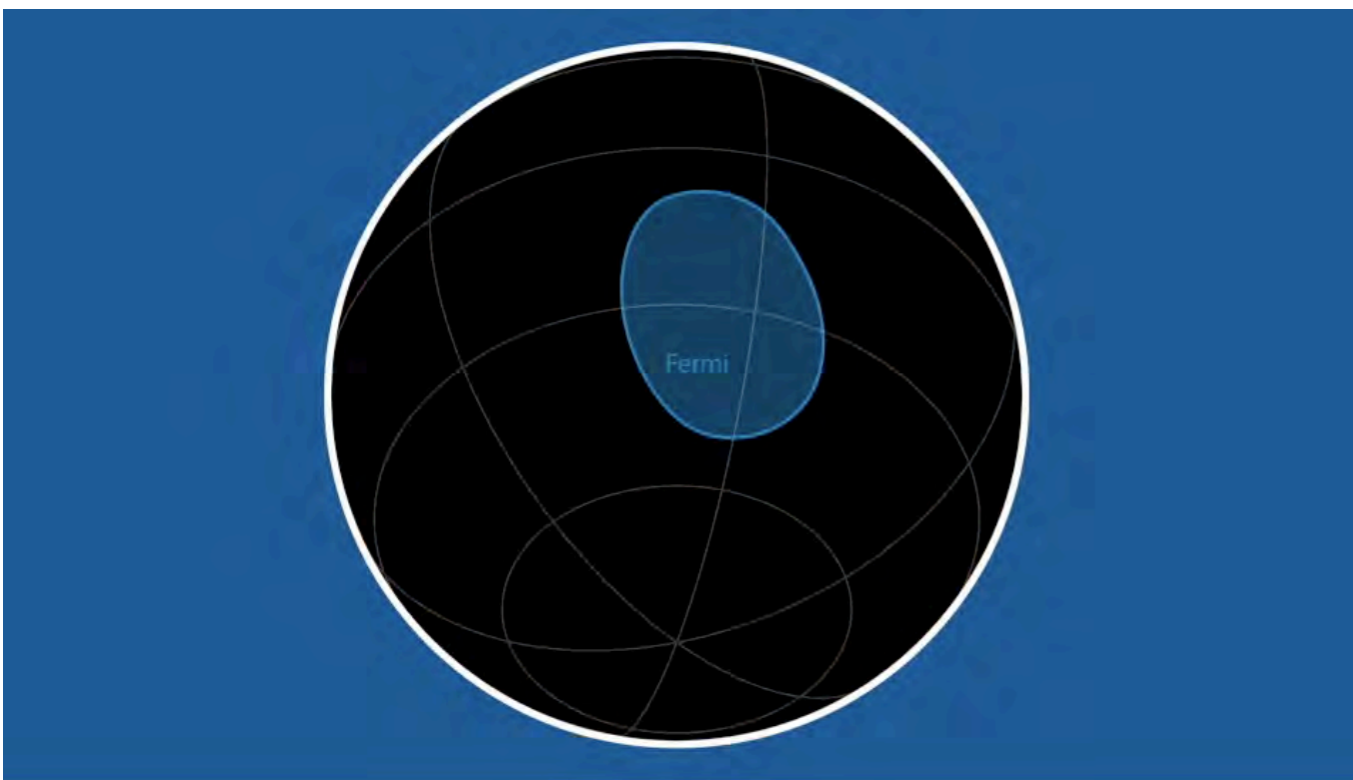
GW170817



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

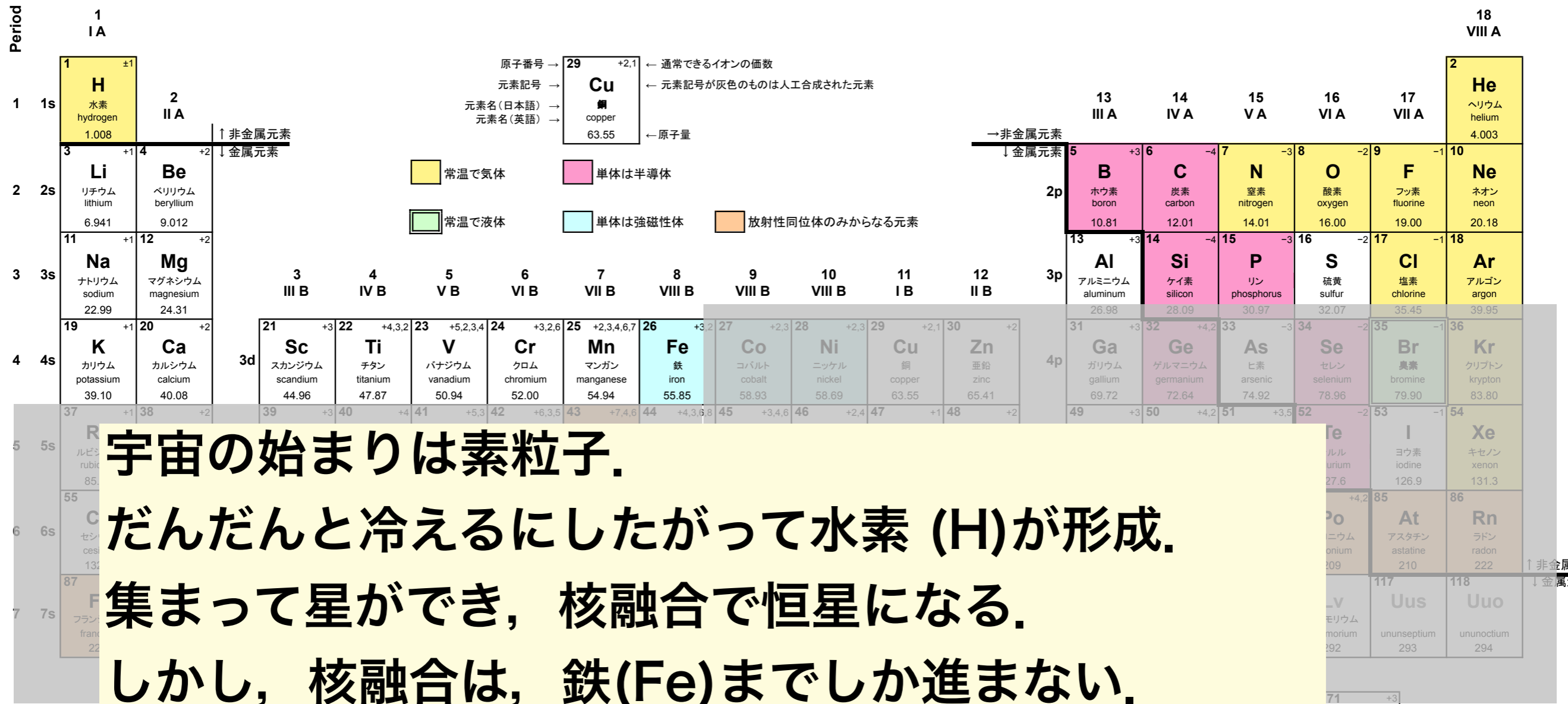
GW170817

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



波源はNGC4993 (40Mpc先) !

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

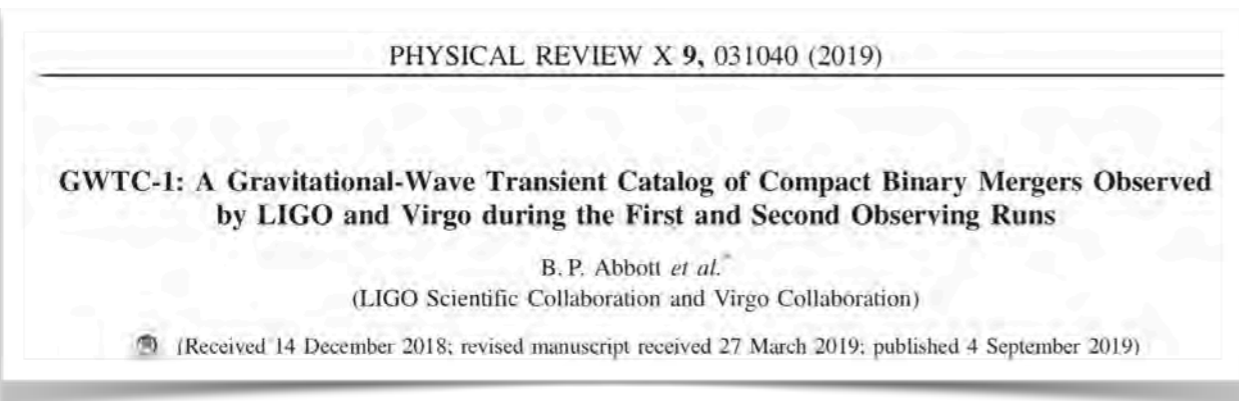


宇宙の始まりは素粒子。
 だんだんと冷えるにしたがって水素 (H) が形成。
 集まって星ができ、核融合で恒星になる。
 しかし、核融合は、鉄(Fe)までしか進まない。

現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

超新星爆発で作られた！
中性子星連星合体で作られた！

現在までに BHBH 10例, NSNS 1例の重力波検出報告



2019年4月からの第3期観測では
週に一度の検出の様様...

GWTC-1: A GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG ... PHYS. REV. X 9, 031040 (2019)

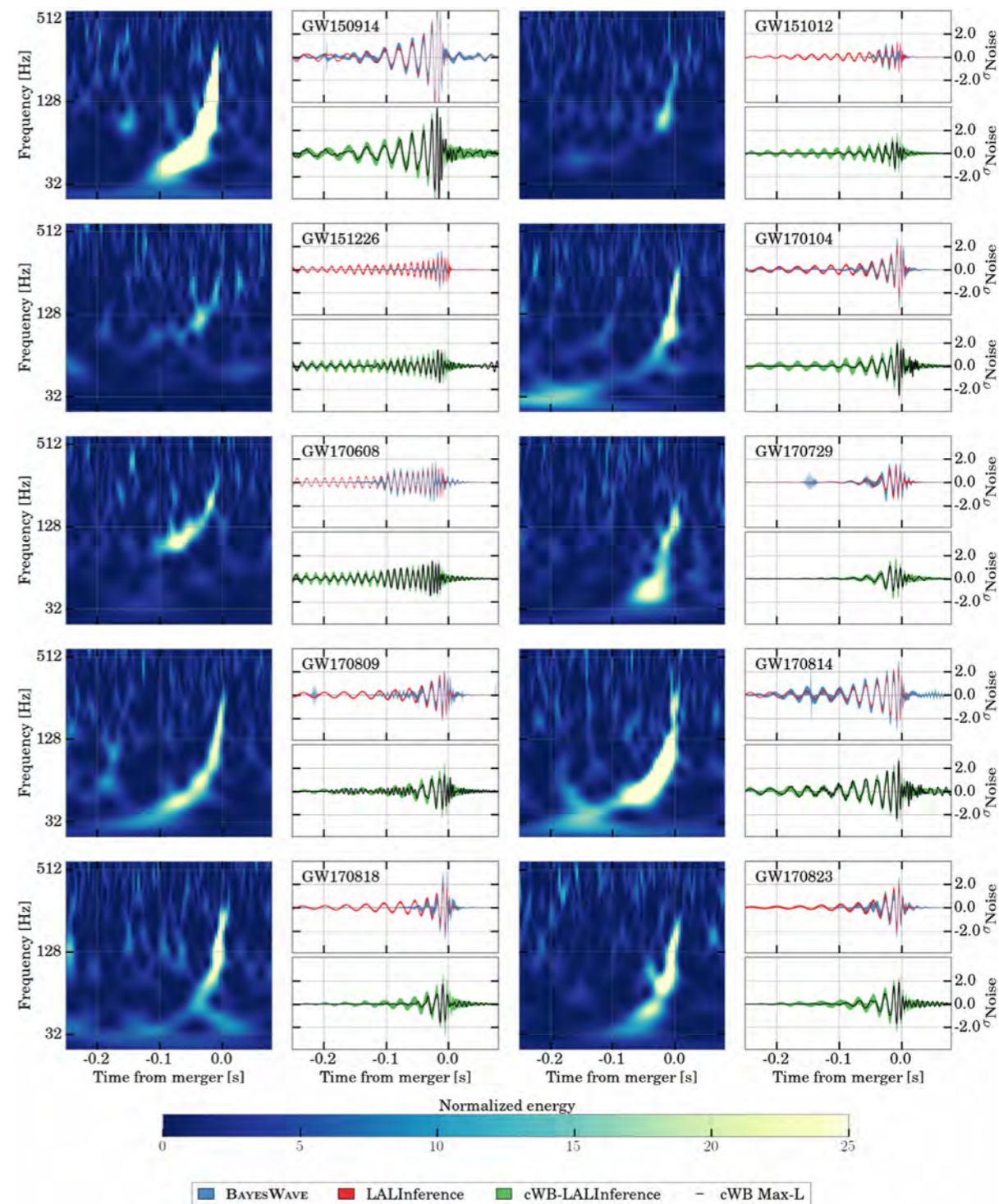
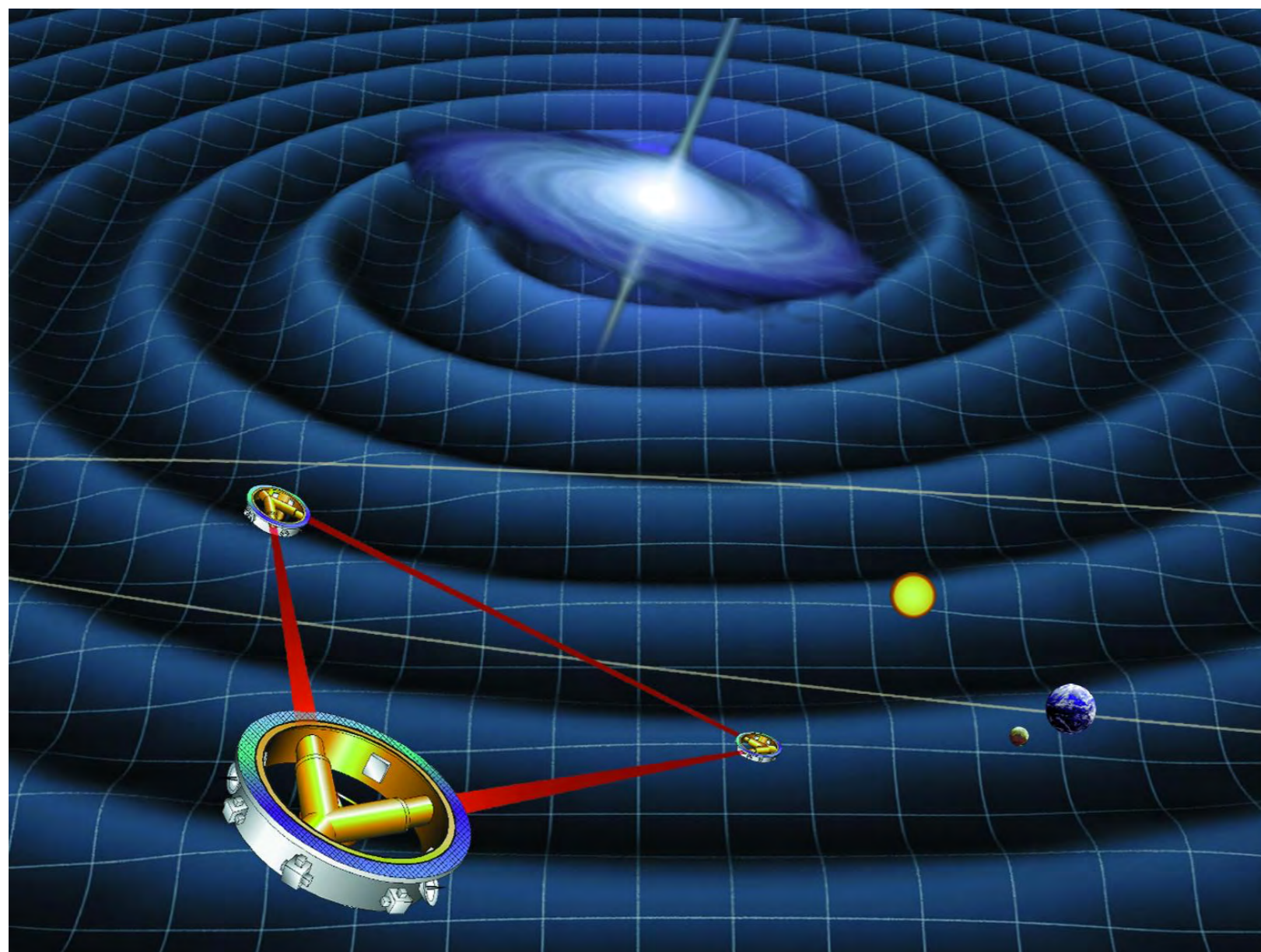


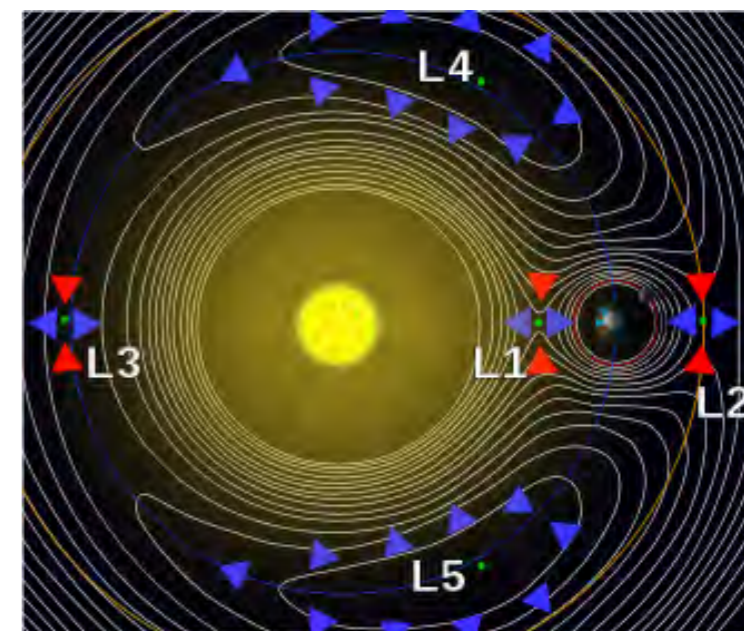
FIG. 10. Time-frequency maps and reconstructed signal waveforms for the ten BBH events. Each event is represented with three panels showing whitened data from the LIGO detector where the higher SNR is recorded. The first panel shows a normalized time-frequency power map of the GW strain. The remaining pair of panels shows time-domain reconstructions of the whitened signal, in units of the standard deviation of the noise. The upper panels show the 90% credible intervals from the posterior probability density functions of the inferred parameters inferred using CBC waveform templates from Bayesian inference (LALINFERENCE) with the PhenomD model (red band) and by the BAYESWAVE wavelet model (blue band) [53]. The lower panels show the point estimates from the cWB

重力波宇宙干渉計LISA (リサ) ESA予算承認

Laser Interferometer Space Antenna

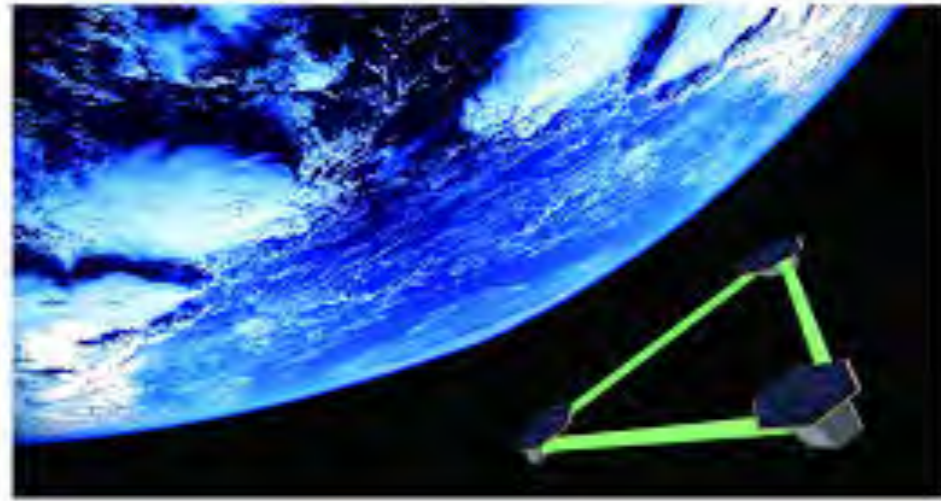


2034年に打ち上げ予定
250万kmの腕の長さ
地球の公転軌道のL4
低周波数帯 (mHzからHz帯)



重力波宇宙干渉計DECIGO (ディサイゴ)

Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory



1000kmの腕の長さ
低周波数帯 (deciHzからHz帯)

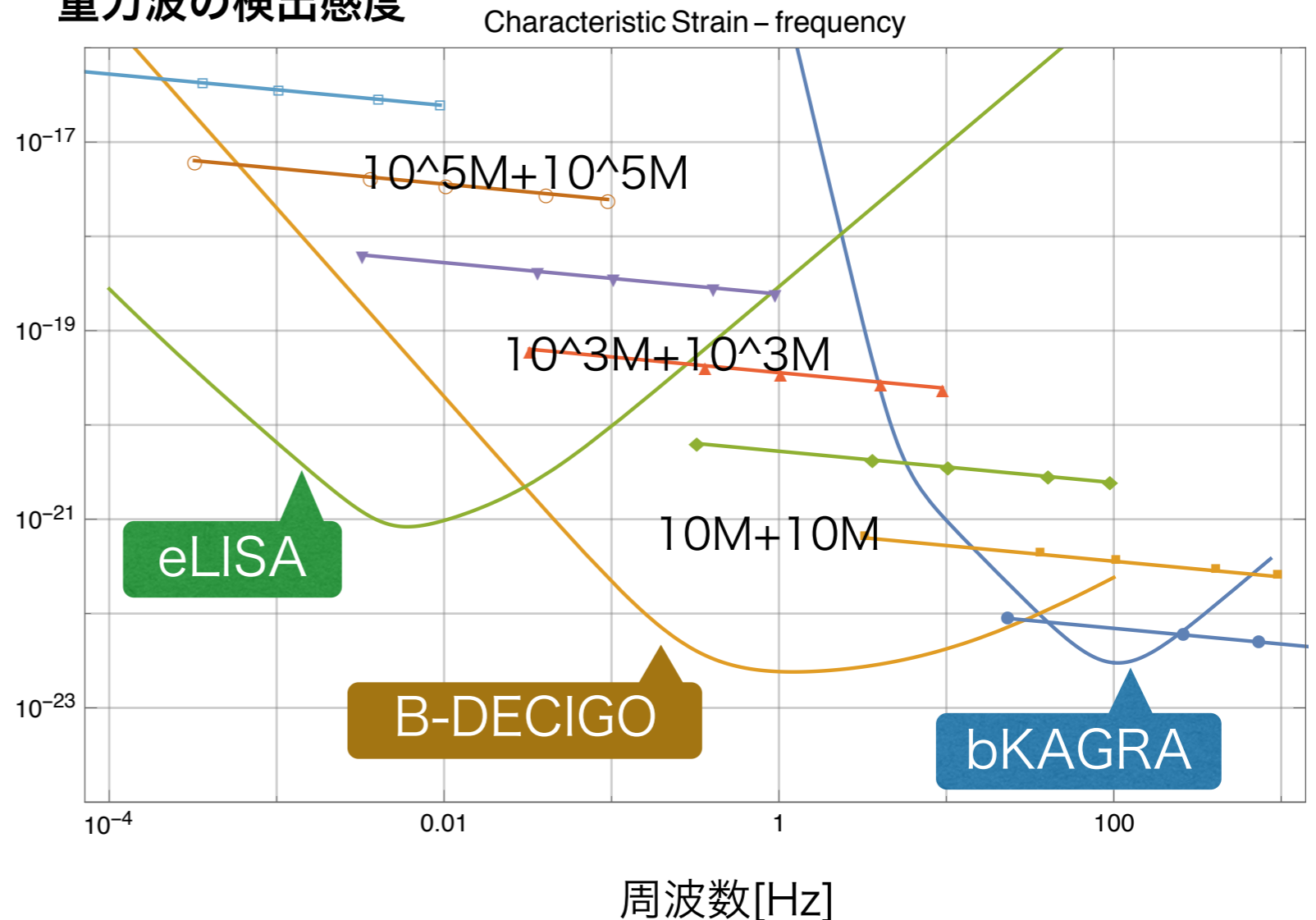
宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大ブラックホール
形成過程がわかる

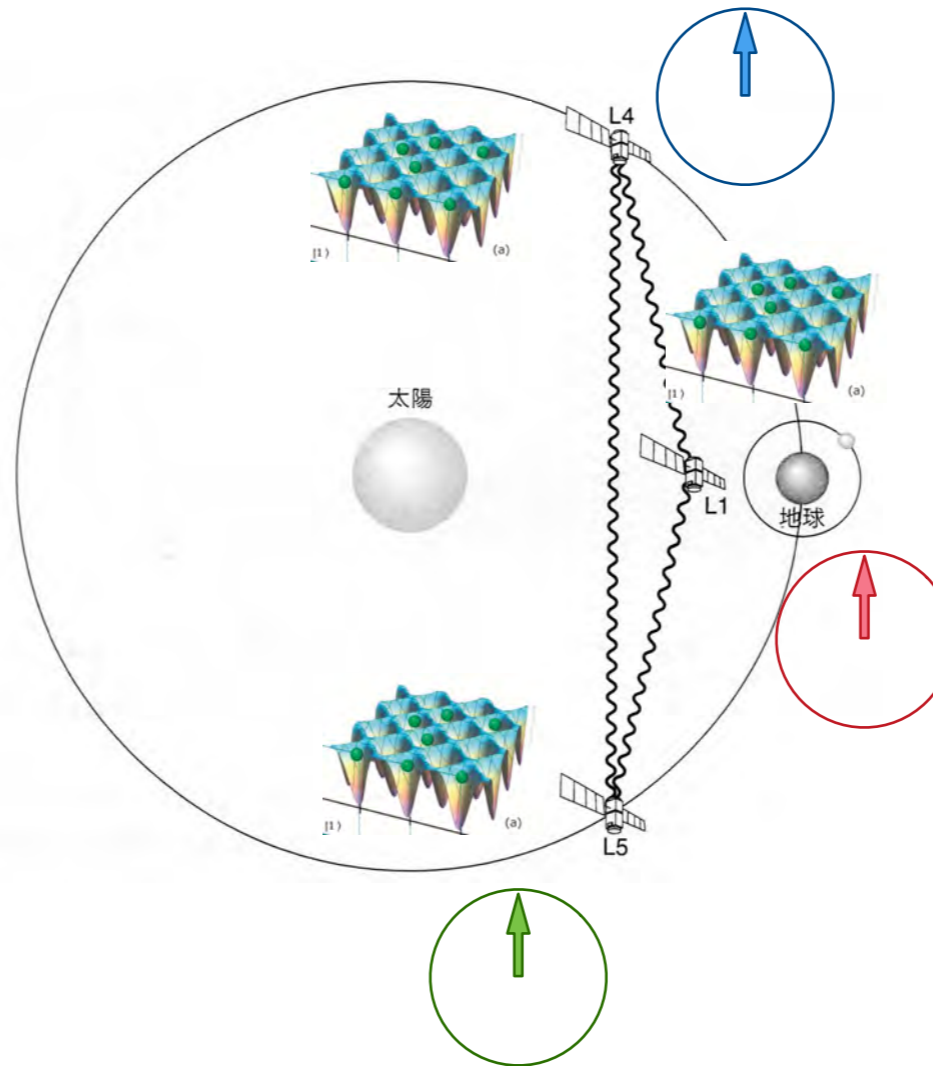
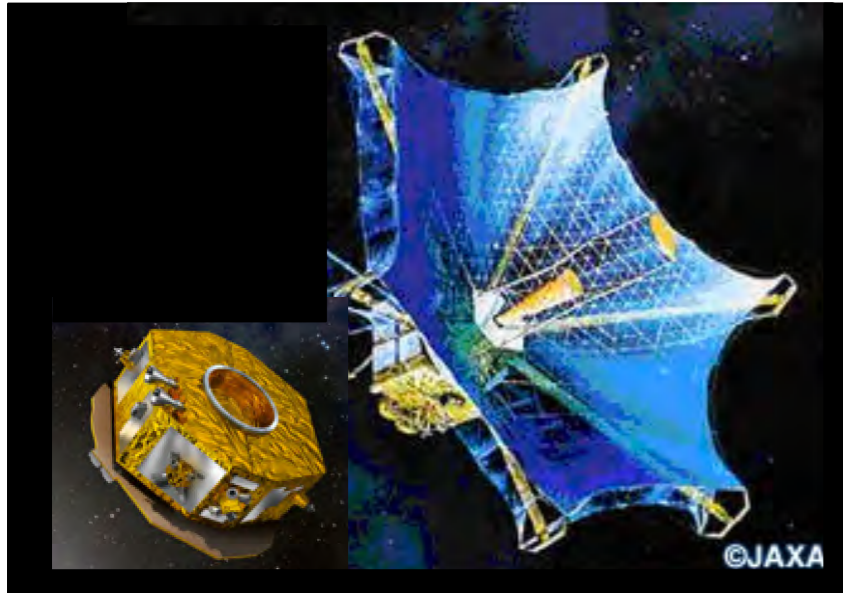
宇宙の膨張速度がわかる

重力波の検出感度



宇宙空間光格子時計ネットワーク INO

Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks



宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大ブラックホール
形成過程がわかる



伊能忠敬

江戸時代、日本中で
精密な測量をして地図を作成

重力波天文学で何がわかる？

対応する天体の姿

→ **天体物理学**

ブラックホールの存在する強い重力場

→ **一般相対性理論の検証**

中性子星連星合体のふるまい

→ **原子核の状態方程式**

イベント頻度・統計

→ **星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ**

背景重力波の存在

→ **星形成モデル・宇宙初期モデル**

重力波天文学で何がわかる？

とんでもないこと？ → 世の中、実は5次元... とか

ブレンワールド型 タイムマシン1

～膜宇宙に生じる近道～

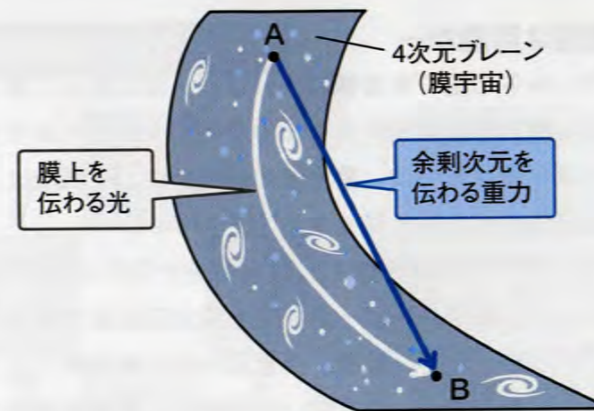
ブレンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

ランドールとサンドラムによって提案されたモデルのように、4次元の膜は平らである必要はなく、膜上にブラックホールなどの強い重力源がある場合、重力の伝わる力は余剰次元を伝播できるかも速く2点間を結んで伝わるから重力が重力波として伝わり、距離を光速で伝わって届いた重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力波が伝わることも可能だ。

重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力波が伝わることも可能だ。

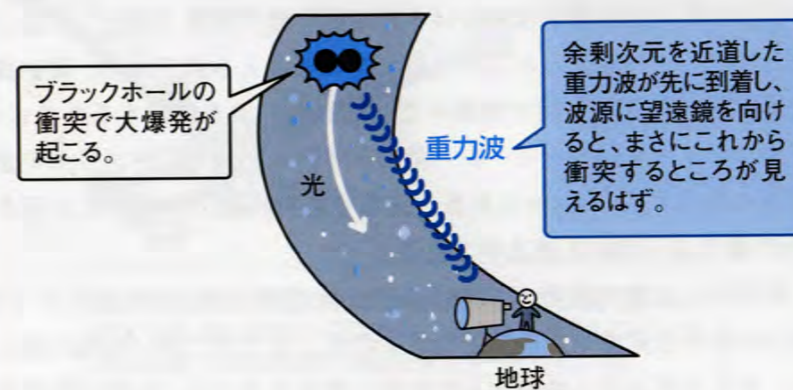
重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力波が伝わることも可能だ。

余剰次元を通過して近道をする



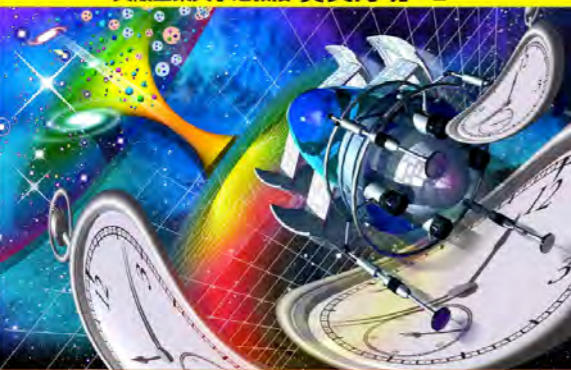
重力は余剰次元を通過することで、膜上を通る光よりも速く伝わることができる。

重力波信号を使えば、光速を超えた速度での情報伝達が可能になり、因果律を破って未来からの情報が伝えられる??



図解雑学 タイムマシンと 時空の科学


大阪工業大学准教授 真貝寿明 著



タイムマシンに関連する最新の物理学研究を紹介し、タイムトラベルの可能性と問題点をやさしく解説します。物理や宇宙の不思議な世界へご招待!

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	F Mラジオ	短波ラジオ	A Mラジオ	飛行機の通信 電波時計

ガンマ線

X線

可視光

赤外

電波

重力波

