

重力波観測は物理学から天文学へ

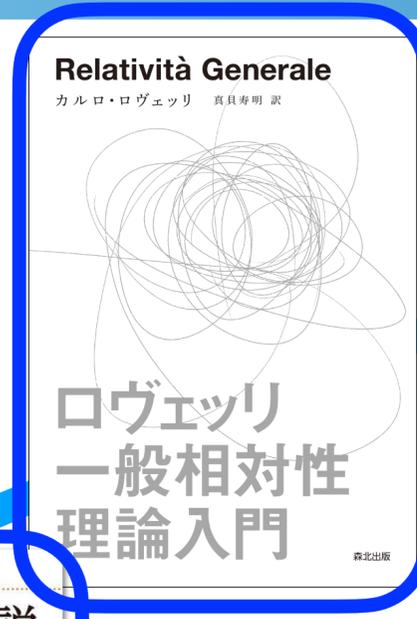
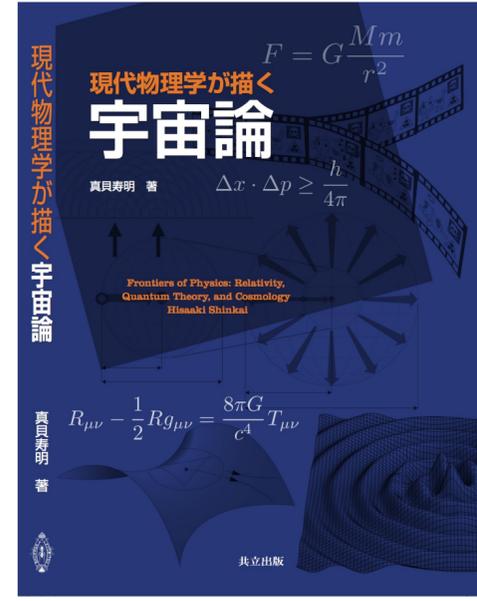
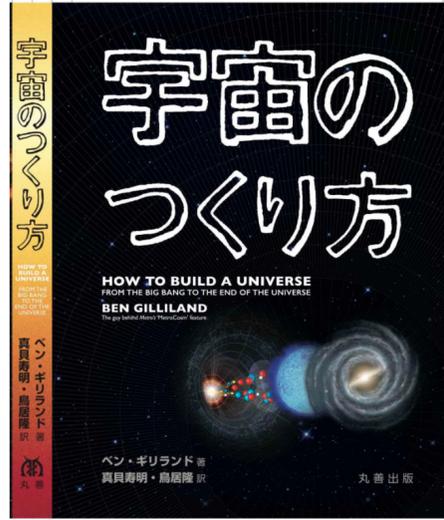
1. アインシュタインの相対性理論
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わかったこと, わからないこと
6. 将来計画

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

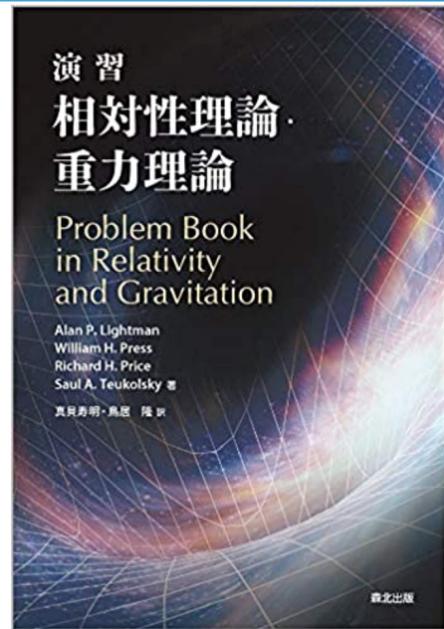


<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

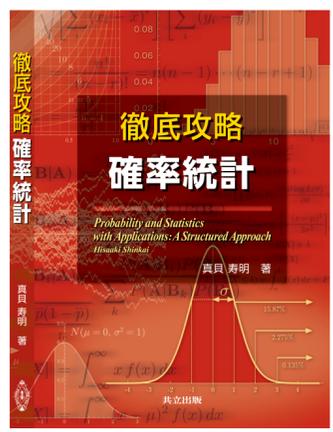
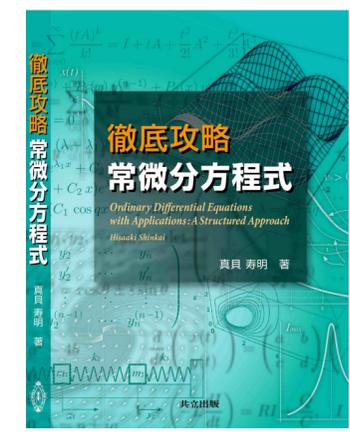
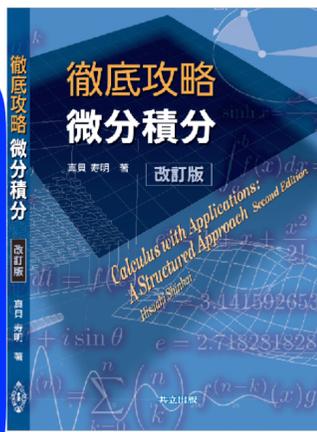
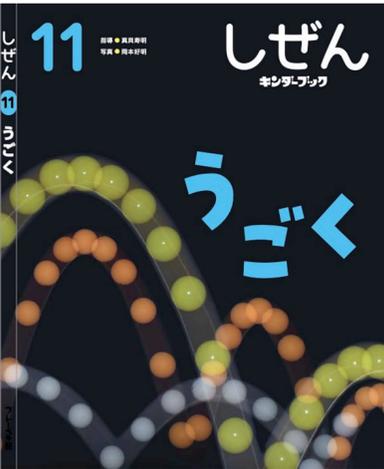
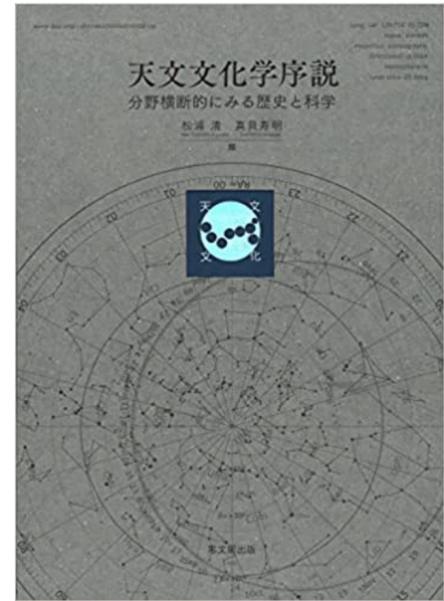
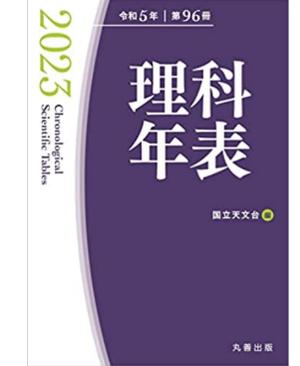
物理の面白さを伝えたい



難しい本

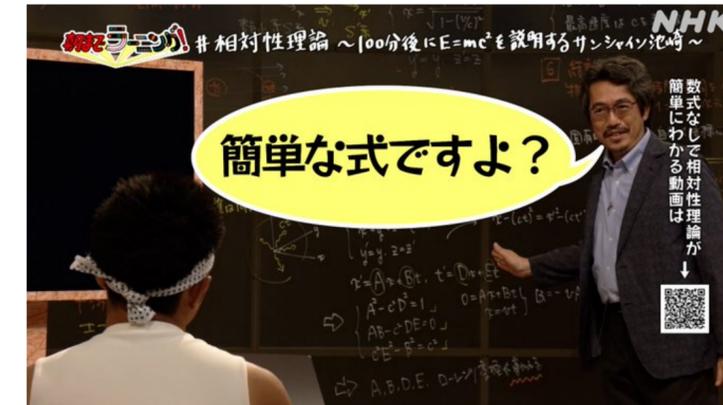


易しい本



わかりやすく伝えたい

The screenshot shows the NHK Learning website interface. At the top, there are navigation links for NHK, NHKについて, コロナ・感染症, ニュース, 番組表, NHKプラス, and 受信料の窓口. The main header features the 'NHKラーニング' logo with the tagline '気づく、見つけるは、楽しい。' (Discovering and finding is fun). Below this, there are three main navigation categories: '豪華講師陣にまなぶ NHKアカデミア', 'テーマで深掘り 動画プレイリスト', and '読めば深まる まなびノート'. The main content area is titled '朝までラーニング' and '100分後にE=mc²を説明するサンシャイン池崎' (Morning Learning: Sanjain Iizumi explains E=mc² 100 minutes later). The main image shows Sanjain Iizumi pointing at a chalkboard filled with mathematical formulas. To the right, there is a video player with an 'オープニング' (Opening) video. Below the video player, there are three video thumbnails with their respective durations: '1時間目 相対性理論 概論 (理系大学生レベル)' (4:26), '2時間目 相対性理論 概論 (一般教養レベル)' (46:56), and '3時間目 一般相対性理論 (チャレンジレベル)' (1:14:45). At the bottom, there is a social media sharing button and a QR code.



【相対性理論 6 池崎編】 サンシャイン池崎と朝までラーニング!

☐ 朝までラーニング!

「相対性理論をサラッと説明できたらカッコいい!」芸人・サンシャイン池崎さんが100分の大学教授の講義に本気で挑む! 難解な数式も登場! 「一からちゃんと理解したい」そんな大人の知的欲求に応えます。池崎さんの本気の推し、櫻坂46・小池美波さんが内緒で登場! なななな~なななな~ナレーションはジョイマン高木さん。(朝までラーニング! #相対性理論~100分後にE=mc²を説明するサンシャイン池崎)

番組ホームページを見る >

タグ: [朝までラーニング!](#) [サンシャイン池崎](#) [小池美波](#) [アインシュタイン](#) [相対性理論](#) [ジョイマン高木](#)

2023年8月26日深夜放送

現在, NHKのサイトで視聴可能

https://www2.nhk.or.jp/learning/video/?das_id=D0024010735_00000

重力波観測は物理学から天文学へ

1. **アインシュタインの相対性理論**
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わかったこと, わからないこと
6. 将来計画

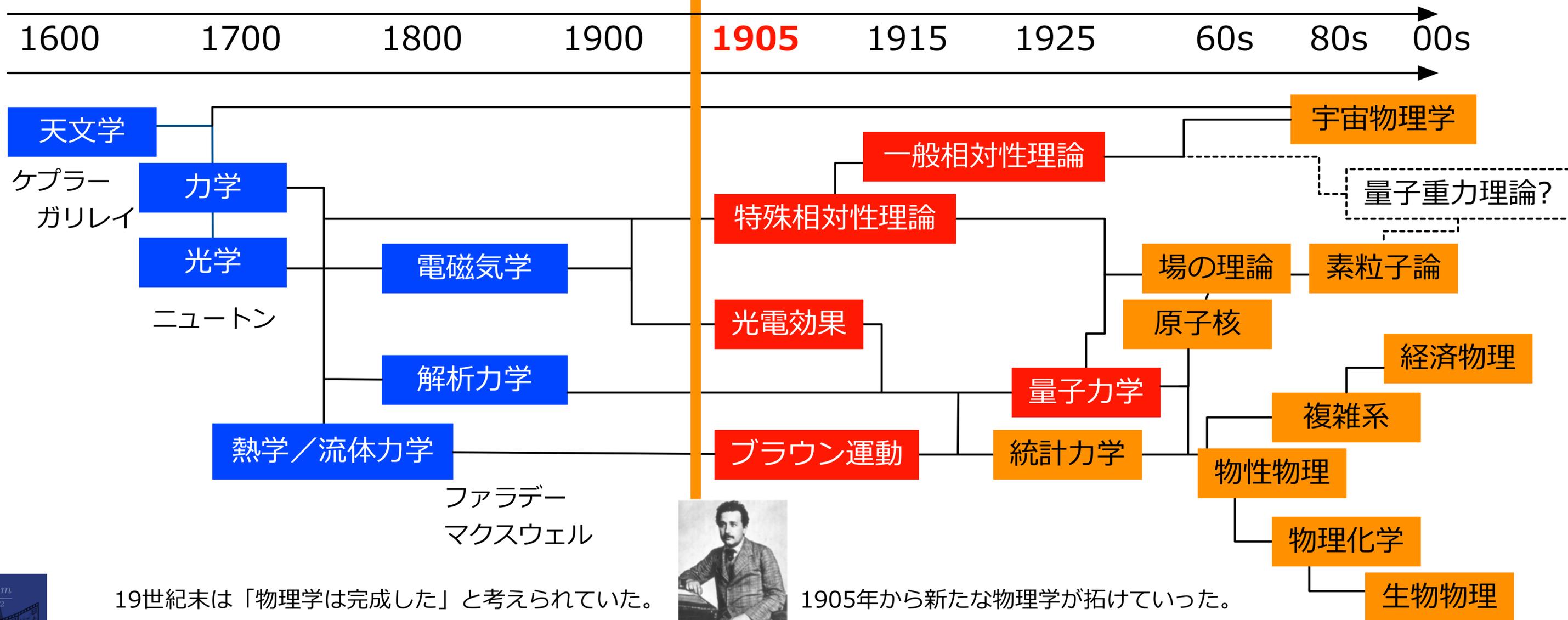
真貝寿明(しんかい ひさあき)
大阪工業大学 情報科学部 教授
武庫川女子大学 非常勤講師
理化学研究所 客員研究員



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

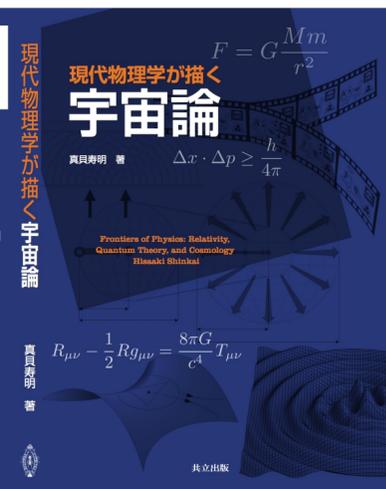
近代物理学の進展

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。



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」

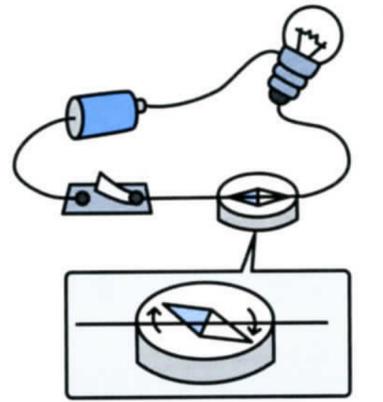
ニュートン力学

$$F = ma$$

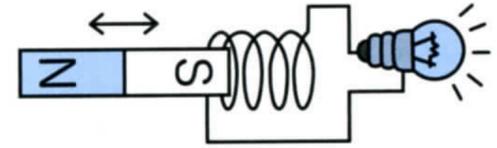


アインシュタイン(26歳)

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。



ファラデー

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)

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???

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

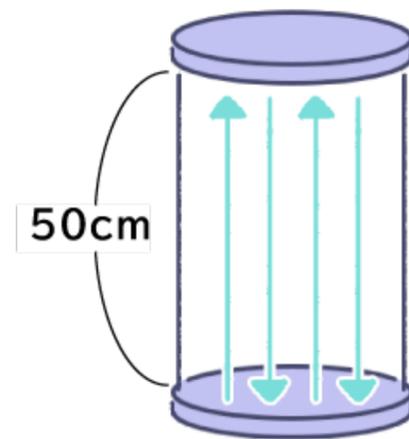


アインシュタイン

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.

光時計の思考実験



光時計

光が 2億9979万2458回往復すると「1秒」を刻む時計

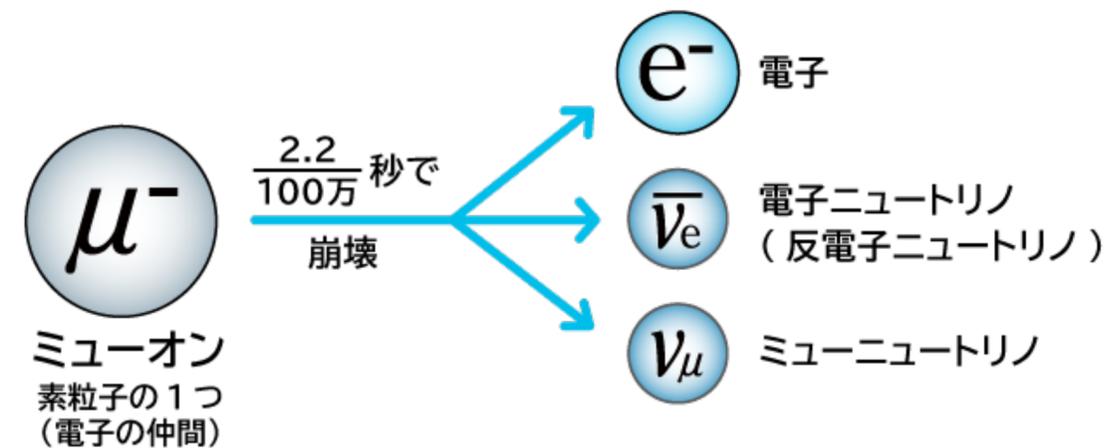
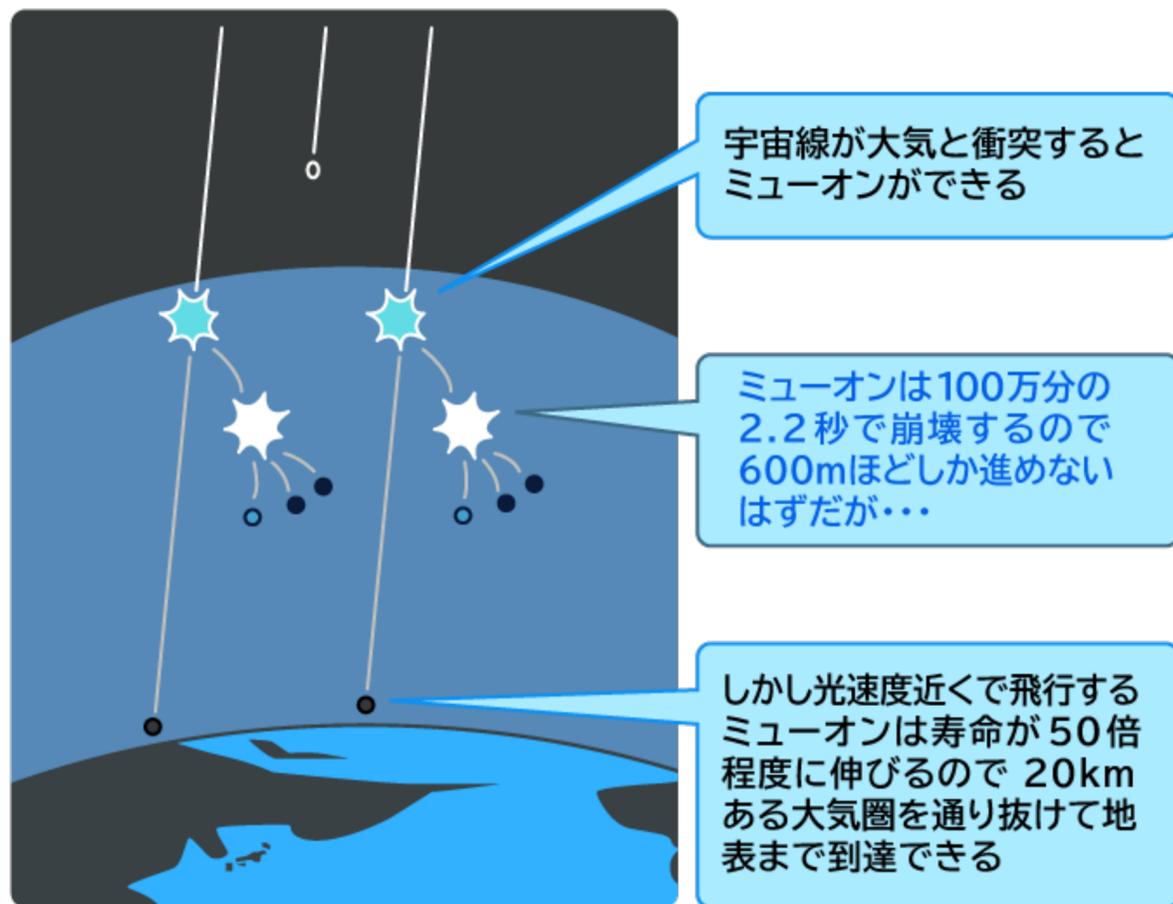


地球の人がロケット内の光時計を見ると ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み その分長い距離を進まなければならない 光の速度は誰から見ても一定なので ロケット内の光時計は 2億9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い時間がかかる つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる

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

時間の進み方は相対的になる

素粒子の寿命は確かに延びている！

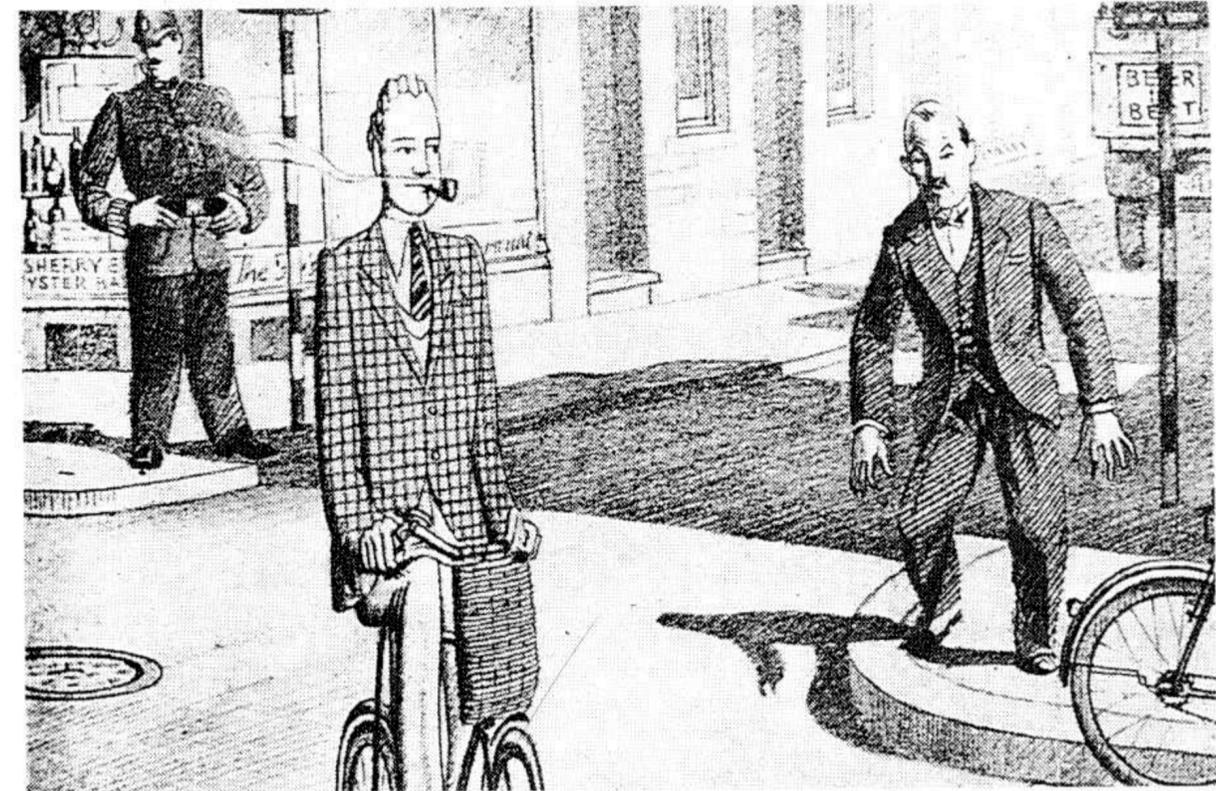
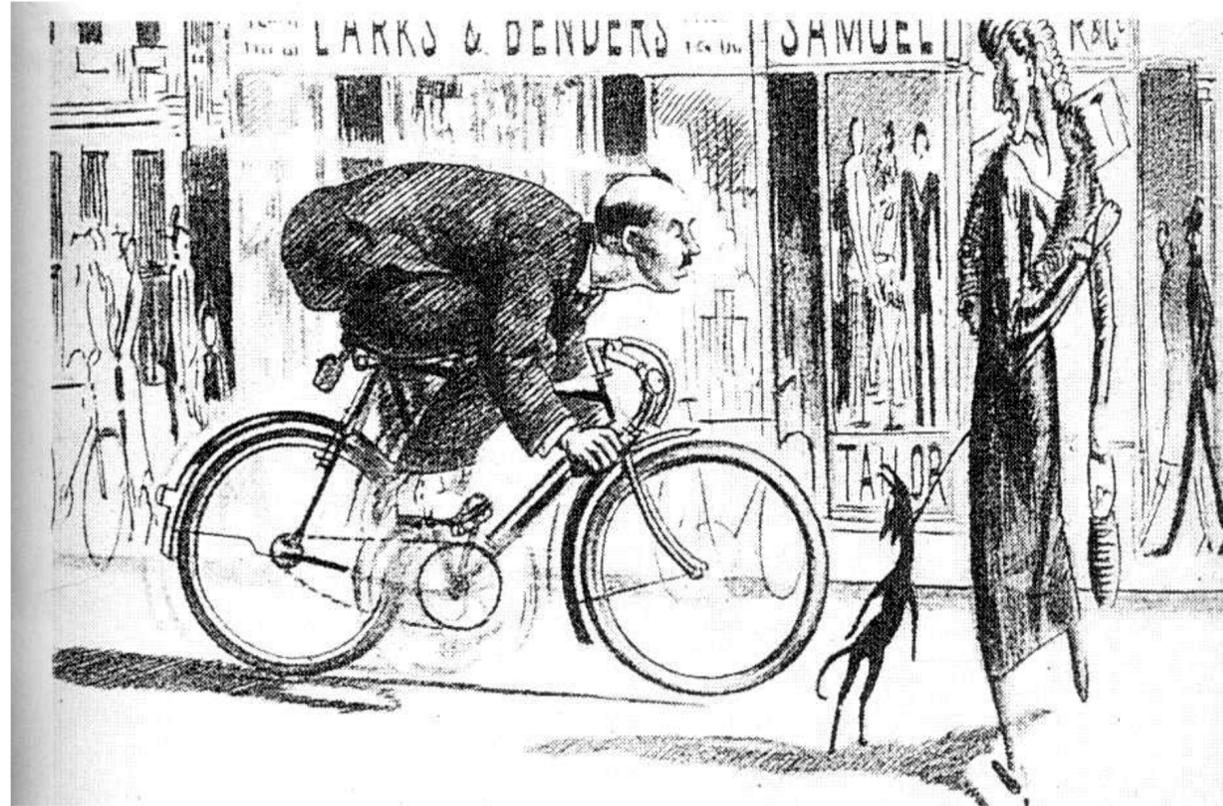


ISSは秒速 7.8km
1年間乗務すると...

0.01067秒 地表より時間が短くなる

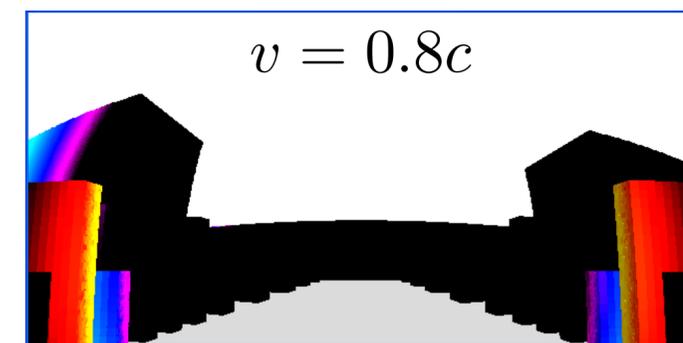
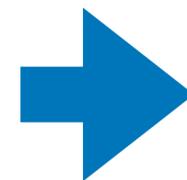
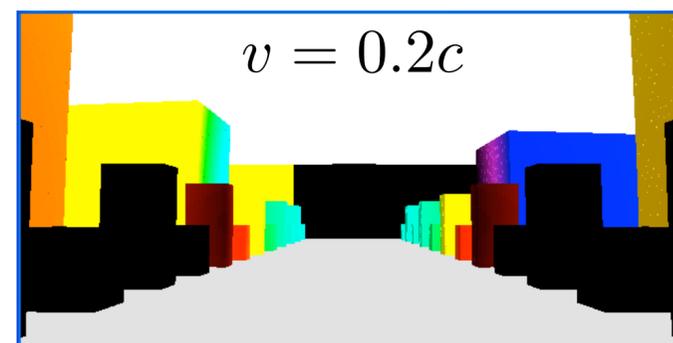
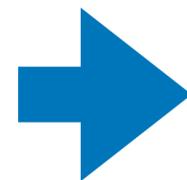
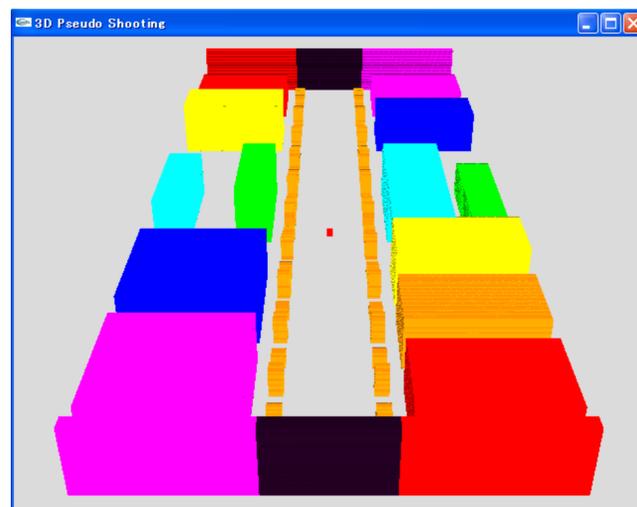
ガモフ 『不思議の国のトムキンス』(1943)

光の速度が時速30km だったとしたら 日常生活でも相対性理論の効果がいろいろみえる



自転車に乗っている人から見ると ゆがんだ風景に

静止している人から自転車の人を見ると 薄っぺらく見える



葭矢景淑君の卒業論文(大阪工業大学情報科学部)から

x+y+zの空間と、時間座標tを合わせて
4次元で物理を考える必要がある！



26歳のアインシュタイン

ローレンツ変換
(Lorentz transformation)

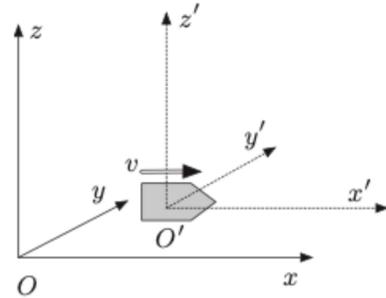


図 3.10 静止している xyz 座標系と、速度 v で x 方向に動いている x'y'z' 座標系。

◆ Advanced ローレンツ変換

ローレンツは、次のような座標変換をしてもマクスウェル方程式は不変であることを示した (1904年)。すなわち、ある慣性系 (t, x, y, z) から +x 方向に速度 v で運動する慣性系 (t', x', y', z') への座標変換として

$$\begin{aligned} t' &= \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\ x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z. \end{aligned} \quad (3.1)$$

速度が光速に近いと
時間の進み方は遅くなる！

この式は、行列とベクトルの積として、次のようにも書ける。

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & \frac{-v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & 0 & 0 \\ \frac{-v}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

未来へ行けるタイムマシンができる

静止質量エネルギー (エネルギーと質量の等価性)

$$E = mc^2$$

静止質量エネルギー (1905年)
(エネルギーと質量の等価性)

エネルギー保存則を4次元で考えると、
質量そのものがエネルギーだ。

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

$$F = ma$$



アインシュタイン
(36歳)



アインシュタイン(26歳)

ニュートン : リンゴはなぜ落ちる？



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

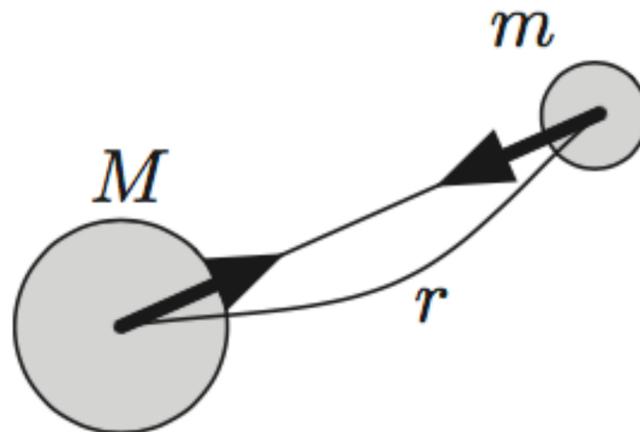


by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



万有引力の法則

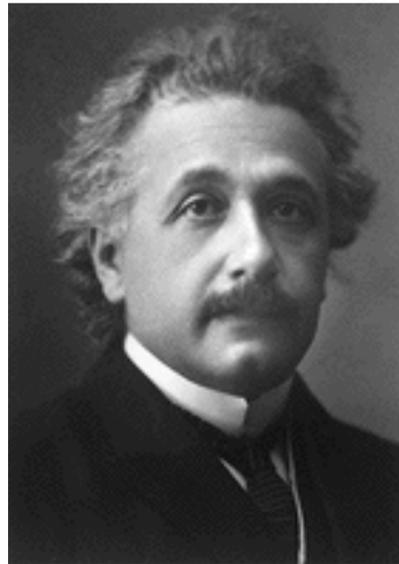
すべてのものは、引力で引き合う

◆ 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

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

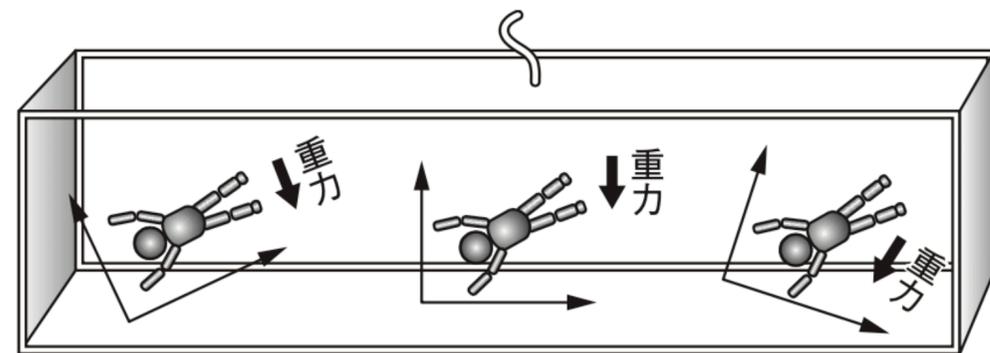
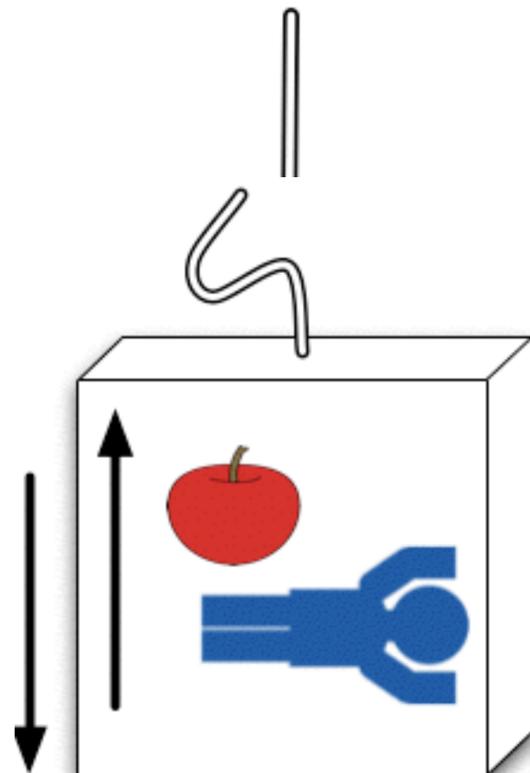
でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



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。

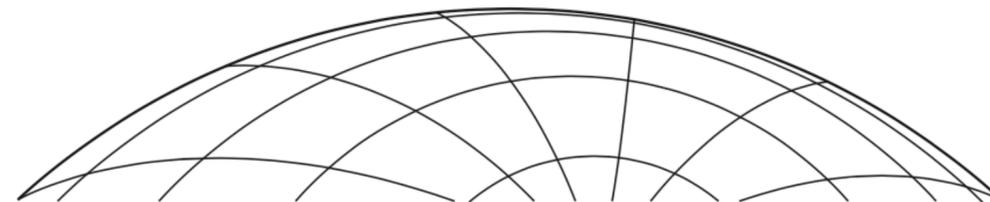
自由落下するエレベータ内では、重力がはたらいっていることを感じない。
重力の局所的には消すことができるが、大域的には消せない。

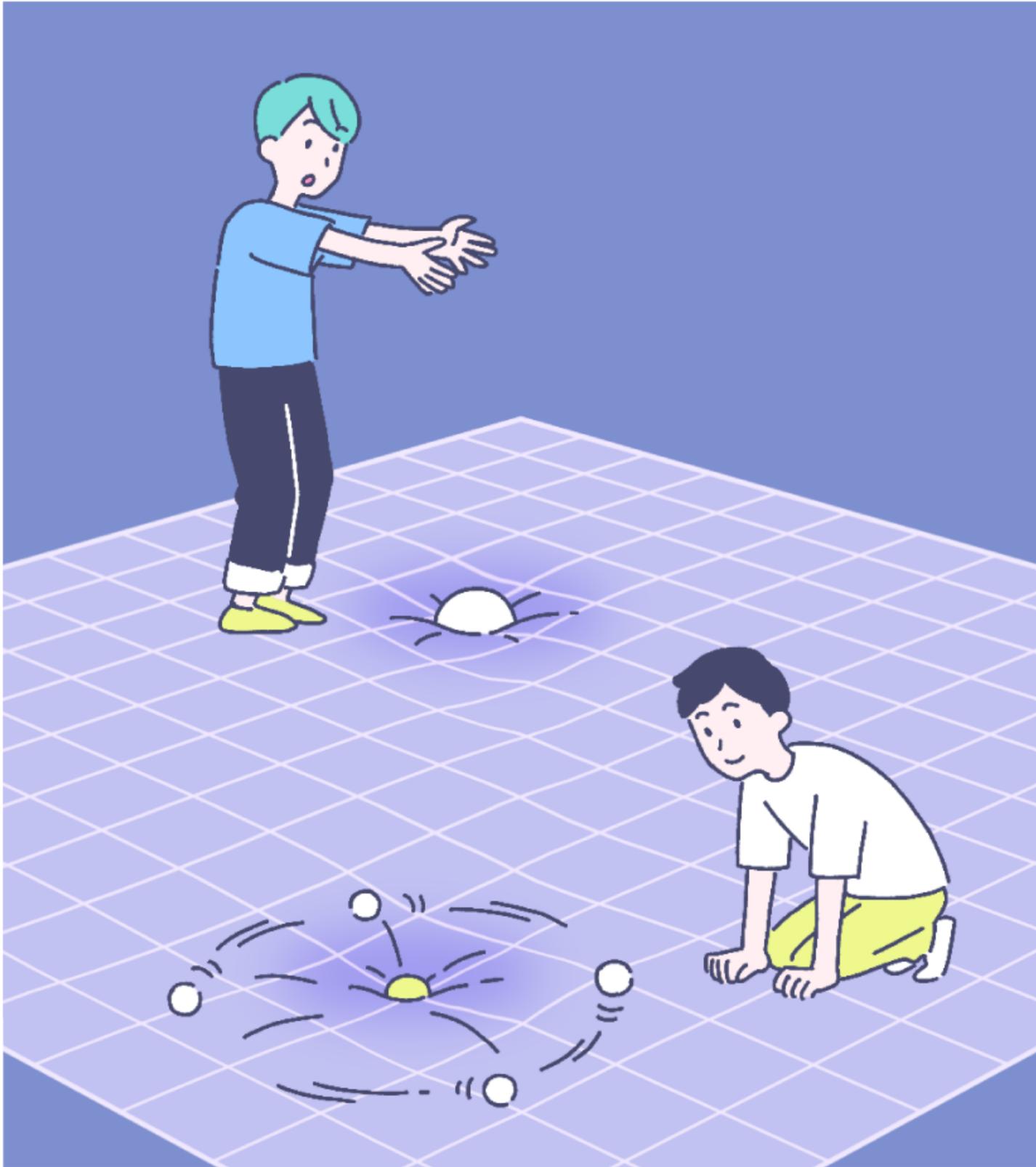


地球の半径ていどの大きさのエレベータだと重力の向きがちがうので、全体で重力を打ち消すことができない。

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





アインシュタイン(1879-1955)

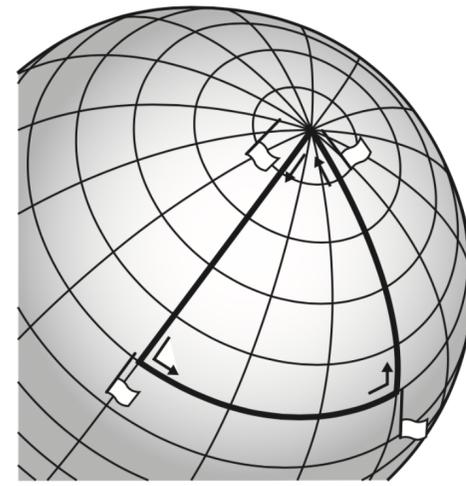
空間のゆがみが重力の原因だ

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



重力の正体は、空間の性質だ

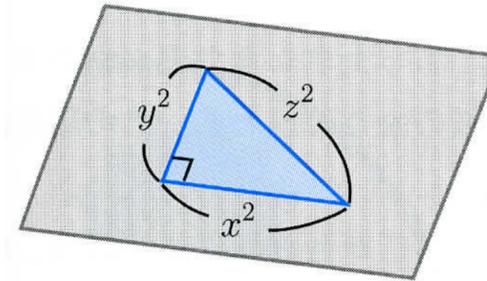
空間のゆがみが
重力の正体だ



正の曲率 (地球表面)

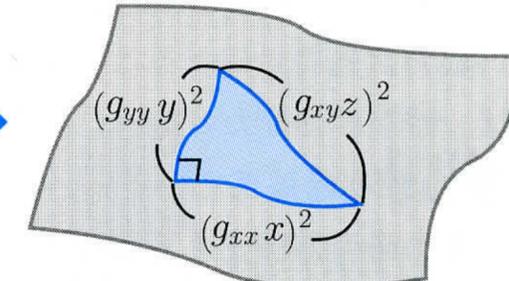
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

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。

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

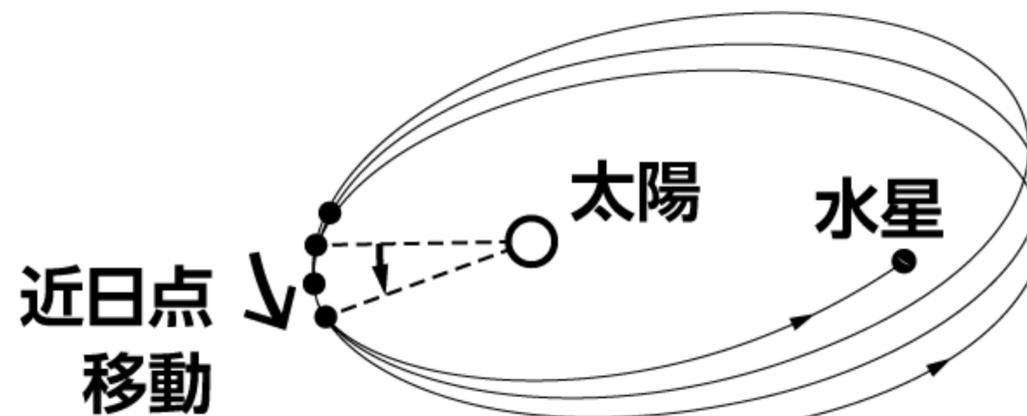
左辺はリーマン幾何学にもとづいて時空がどのように曲がっているのかを表している。右辺は物体がどのように分布しているのかを表す量である。

水星の近日点移動

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)

一般相対性理論が予言したもの

- 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)

X ブラックホール特異点は簡単すぎる仮定をしたからだ

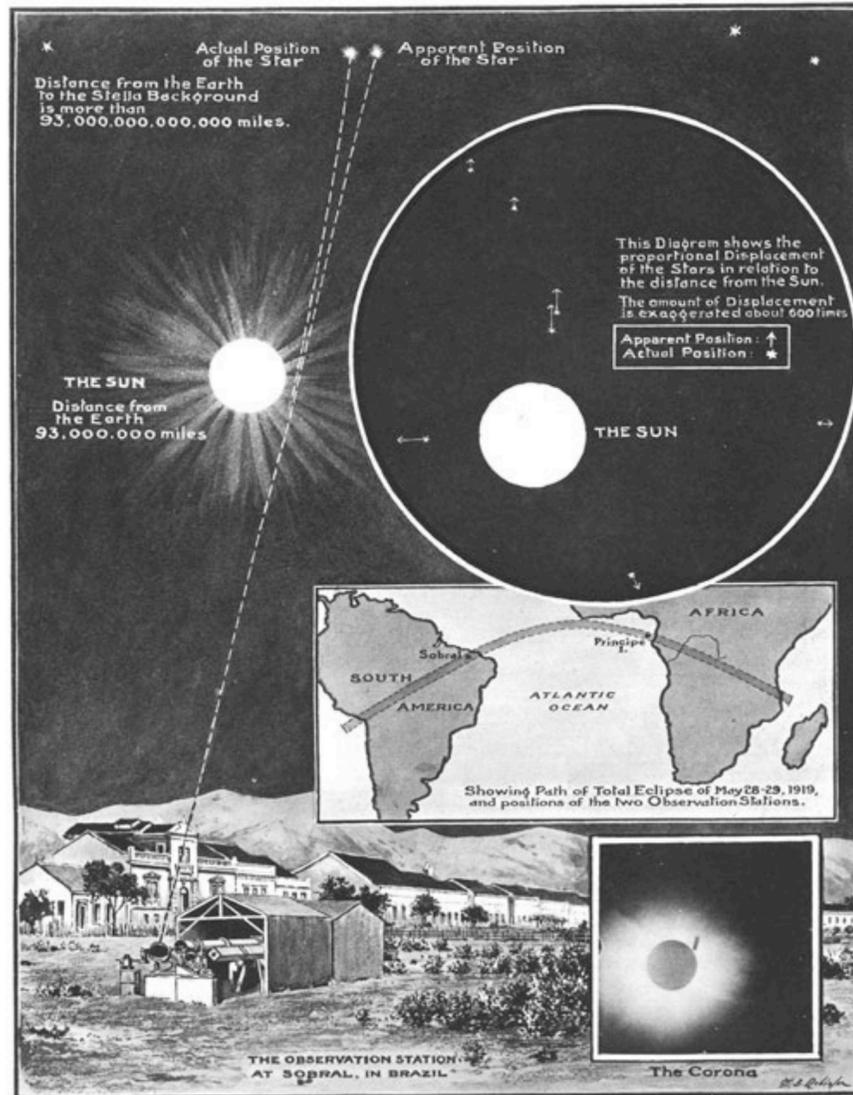
X 宇宙は膨張するはずない

X 重力波は座標系の変換で消せる

X 一般相対性理論は日常生活に影響することはない

一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

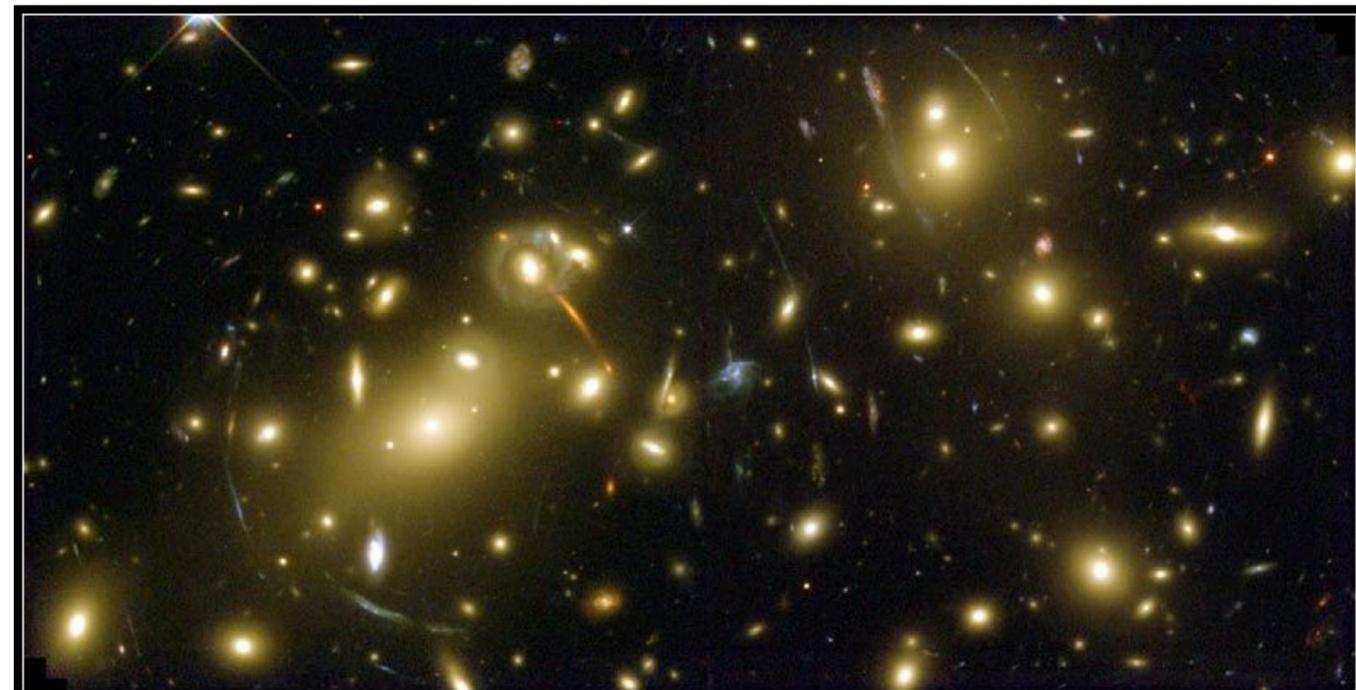
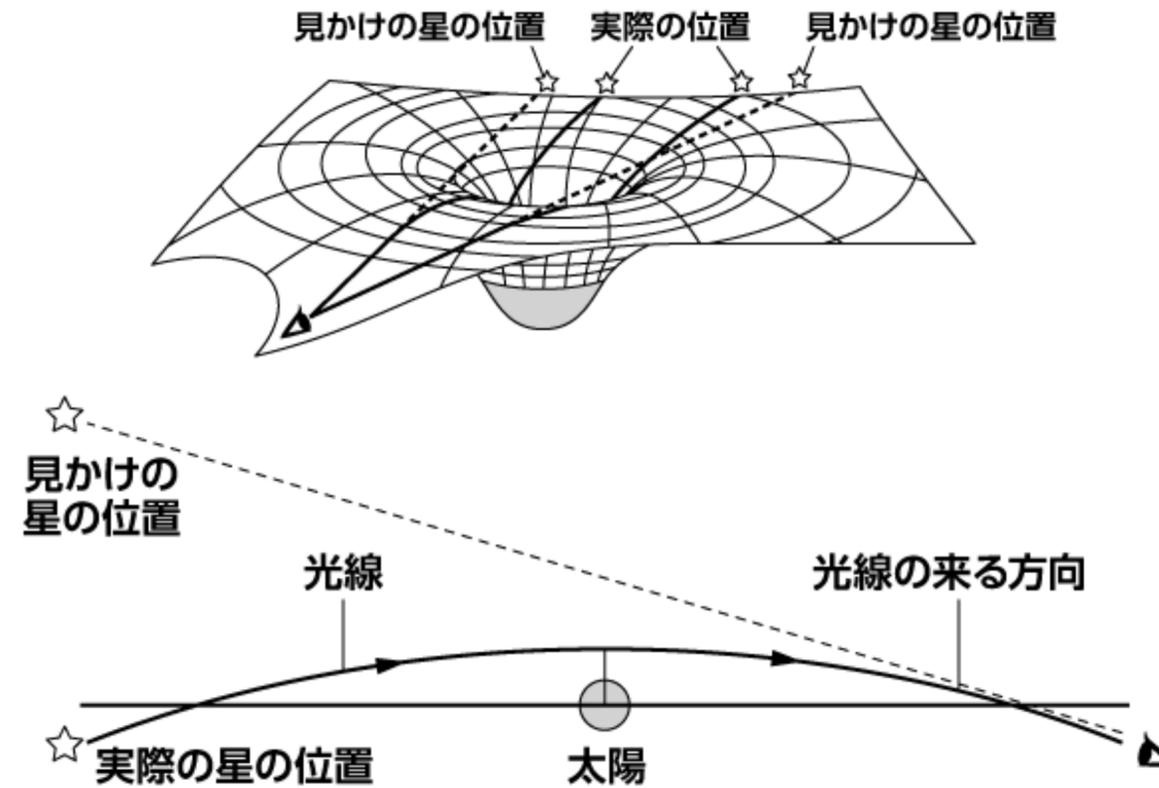
- 重力によってゆがんだ空間では 光の経路も曲がる



出典 Illustrated London News 1919 Nov 22

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▶



Galaxy Cluster Abell 2218

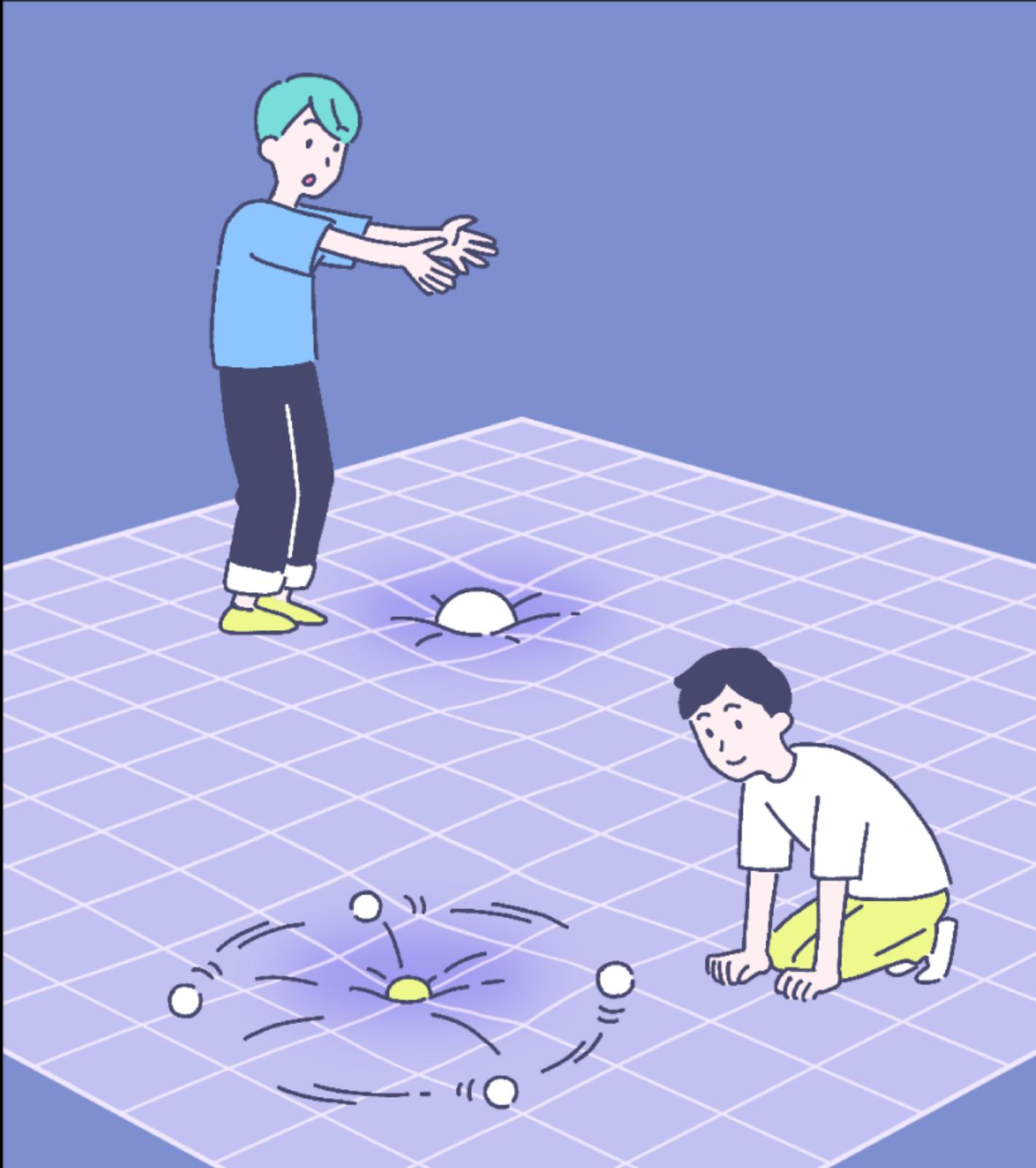
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, STECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2

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

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)

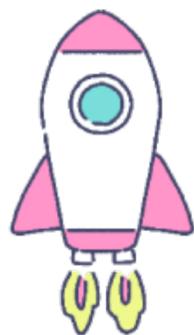
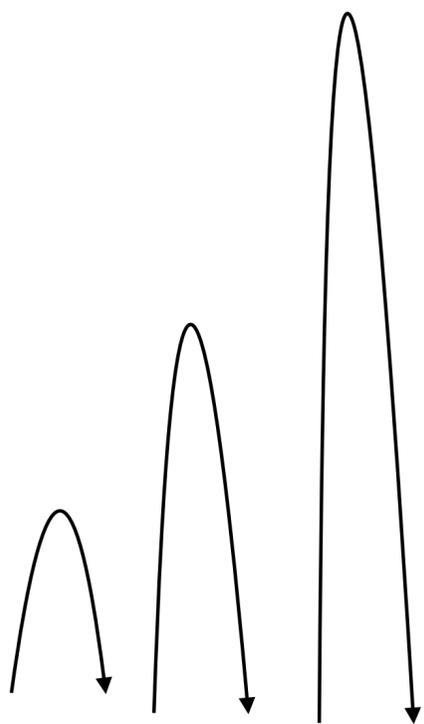
太陽なら半径3km 地球なら半径
9mmにそれぞれの全質量を
押しこめば ブラックホールになる

ホイーラー
命名者については諸説あります

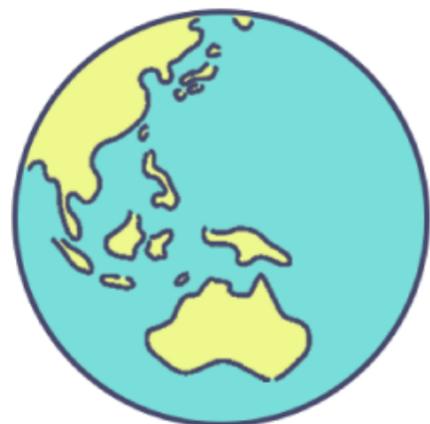
光も脱出できない天体とは・・・

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

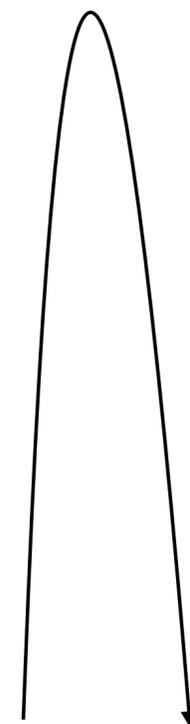


秒速
30万 km



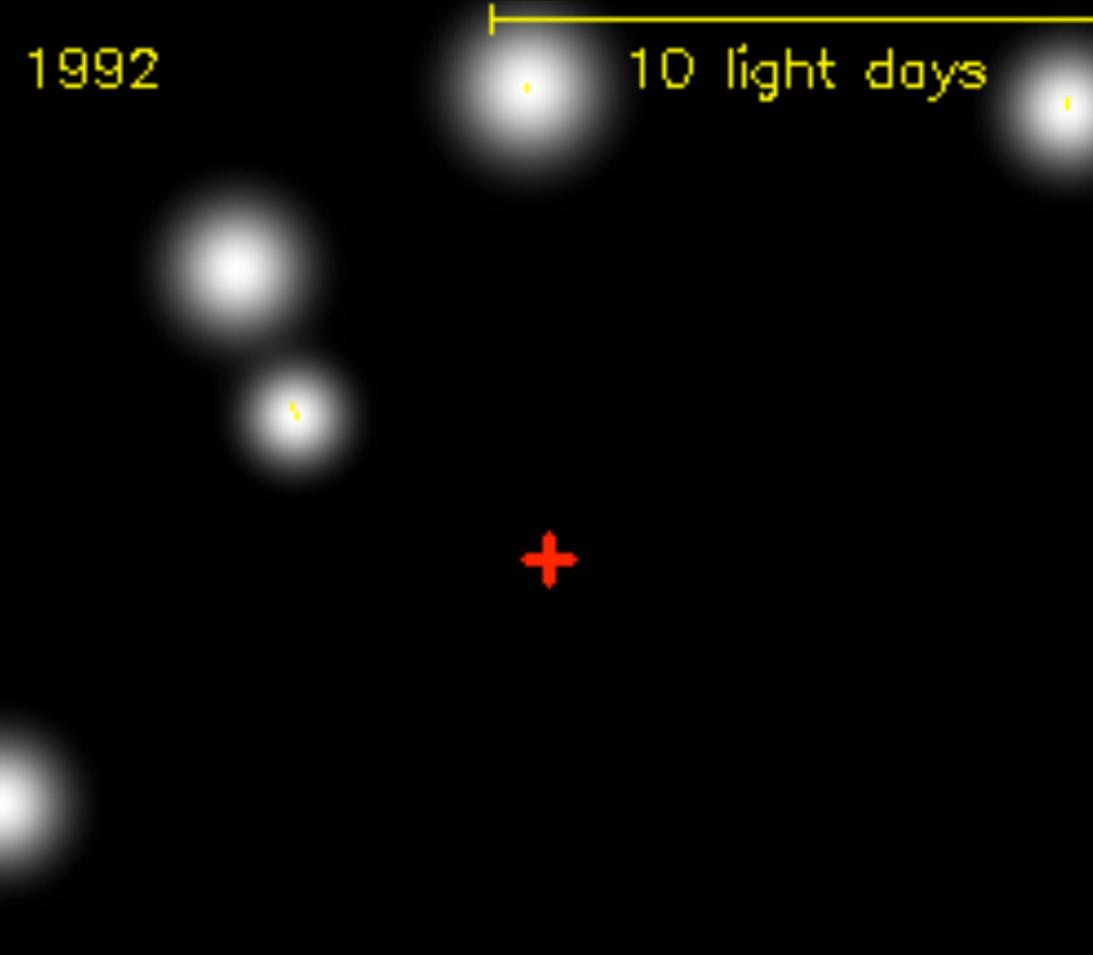
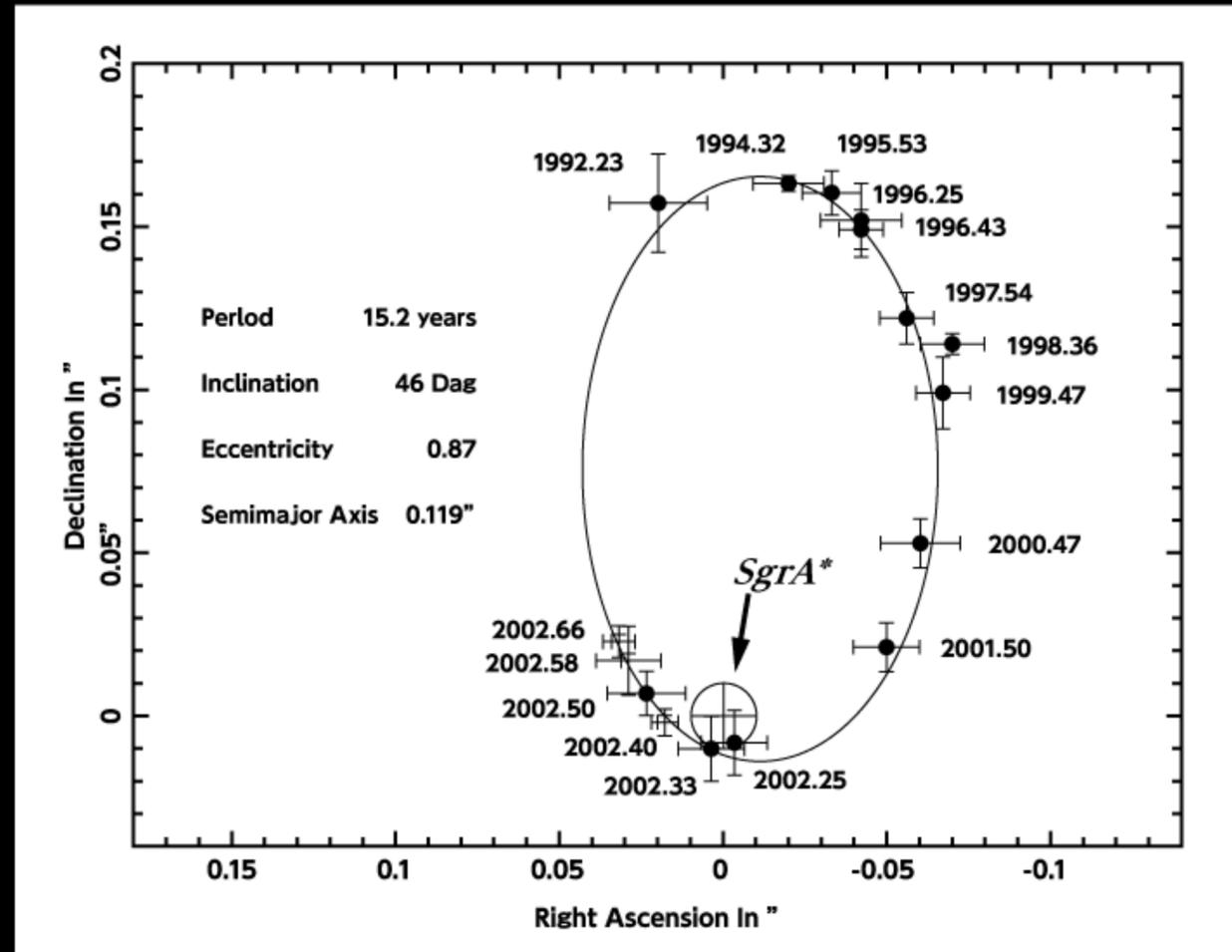
光は当然
脱出できる

光も
脱出できない



地球質量が半径9mmに
なったら
ブラックホール

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

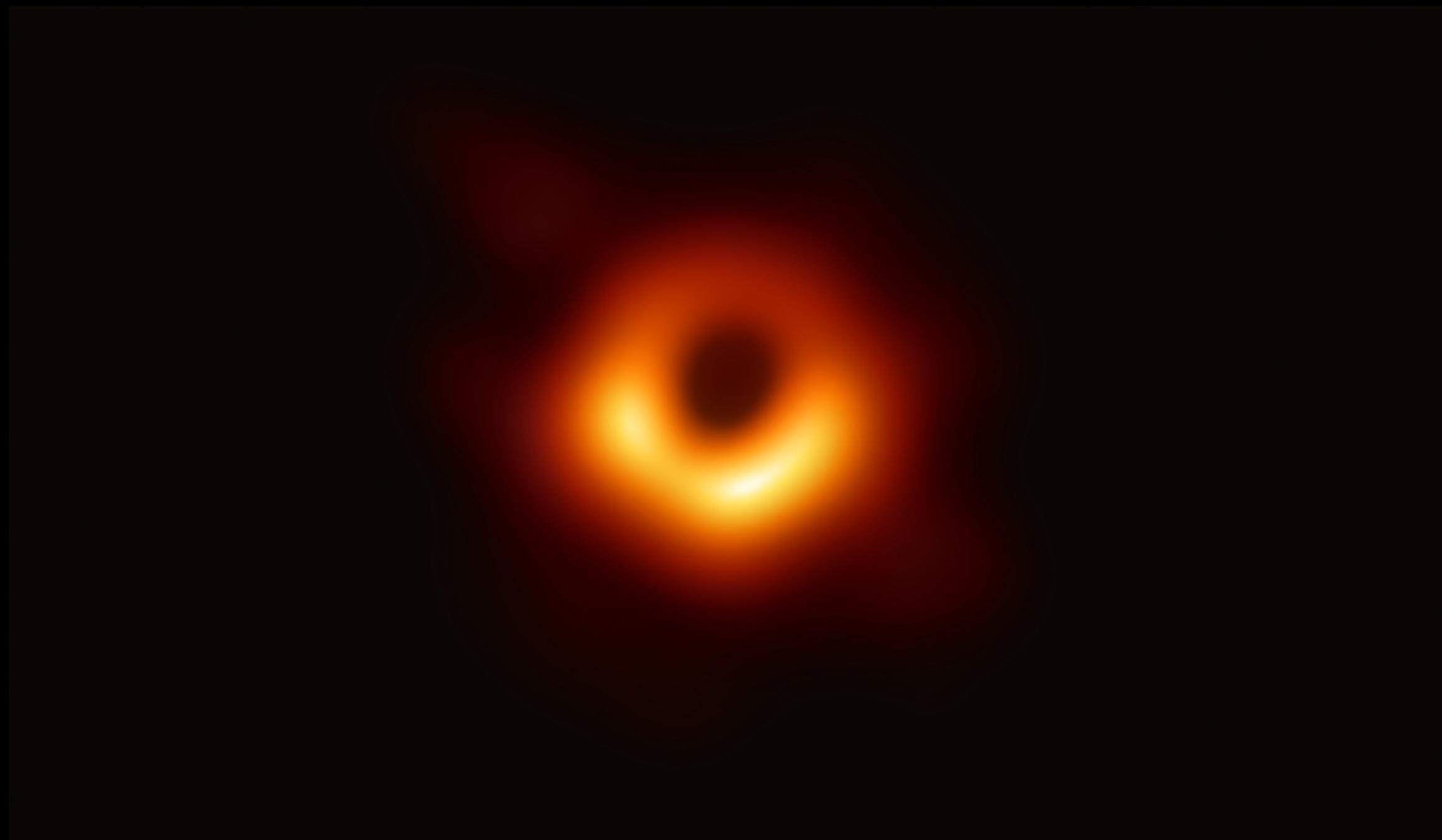
「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

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」

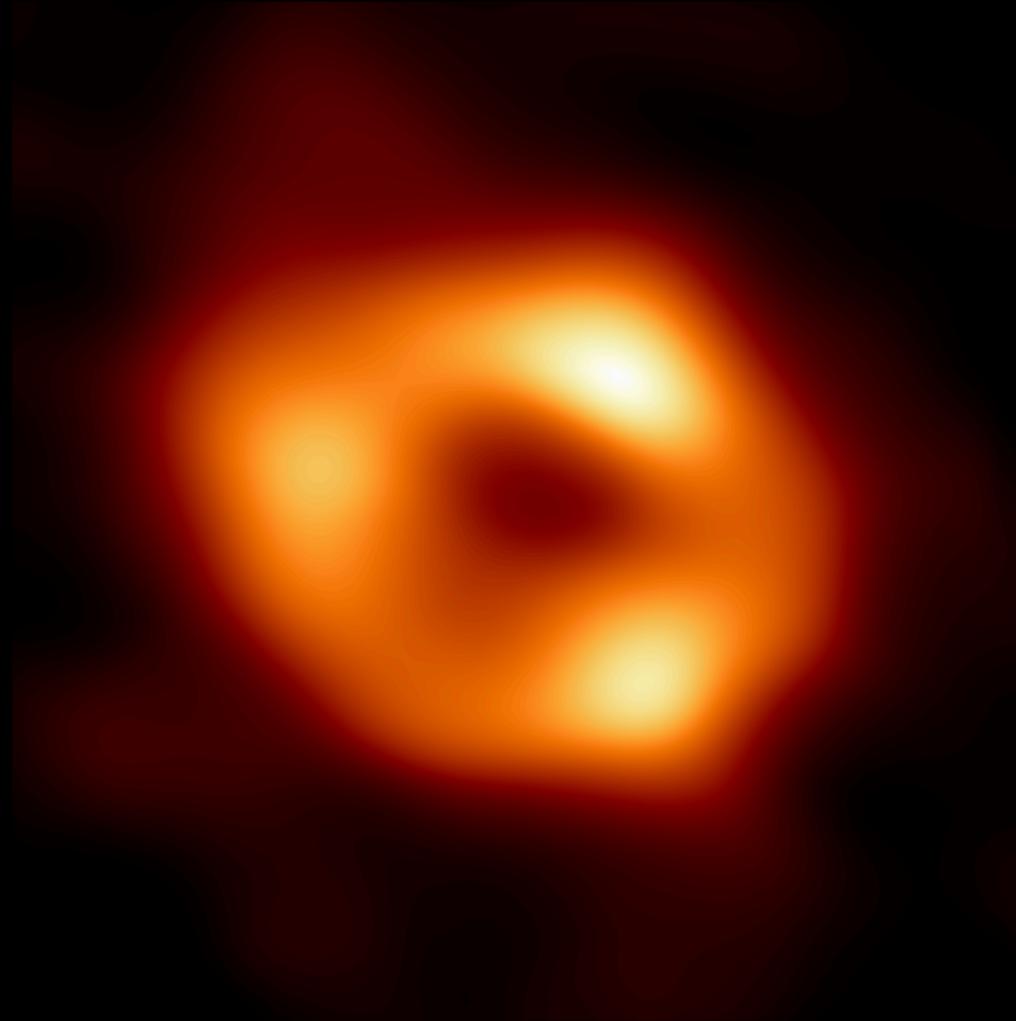
2019年4月10日 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



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

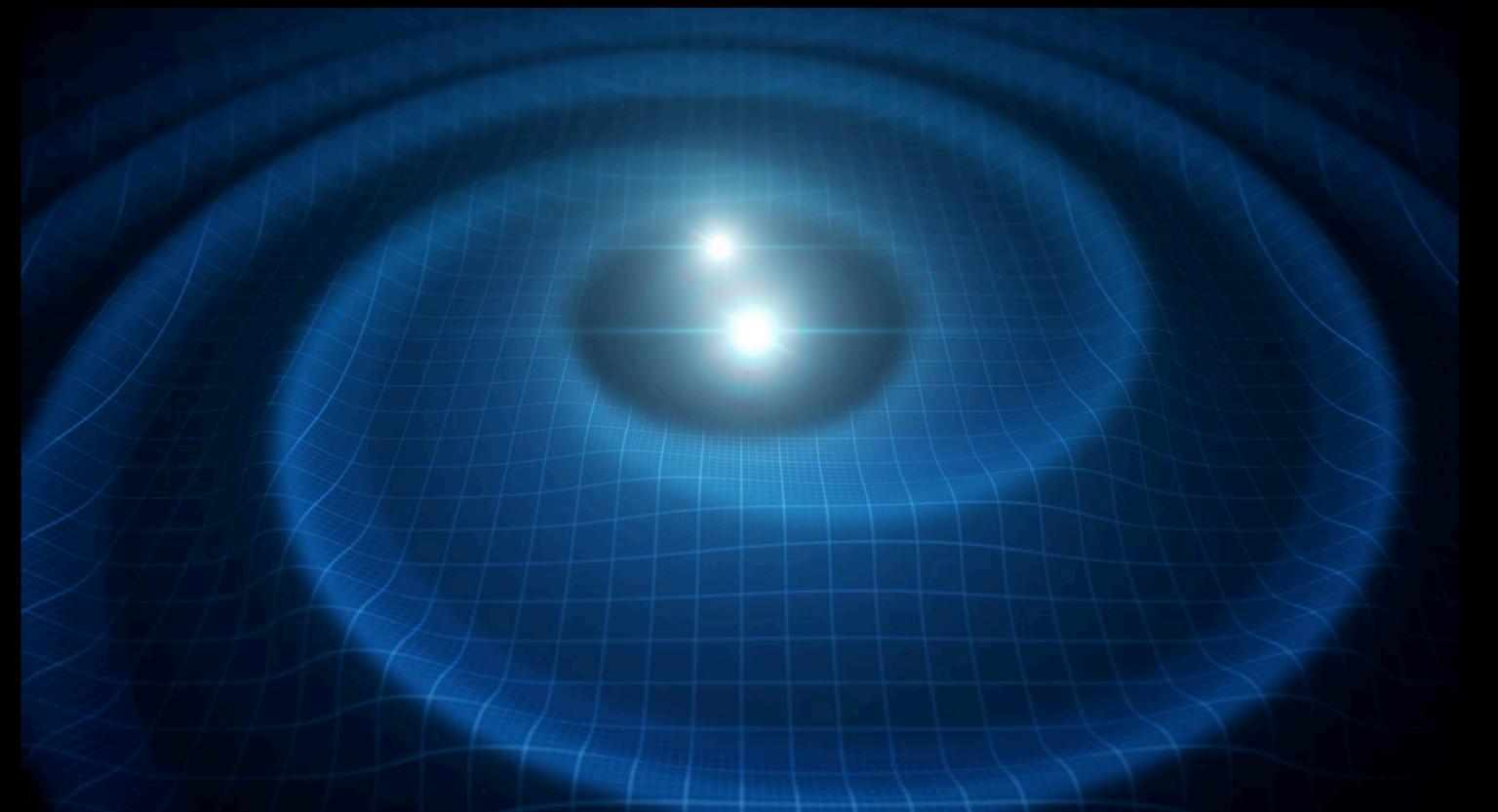
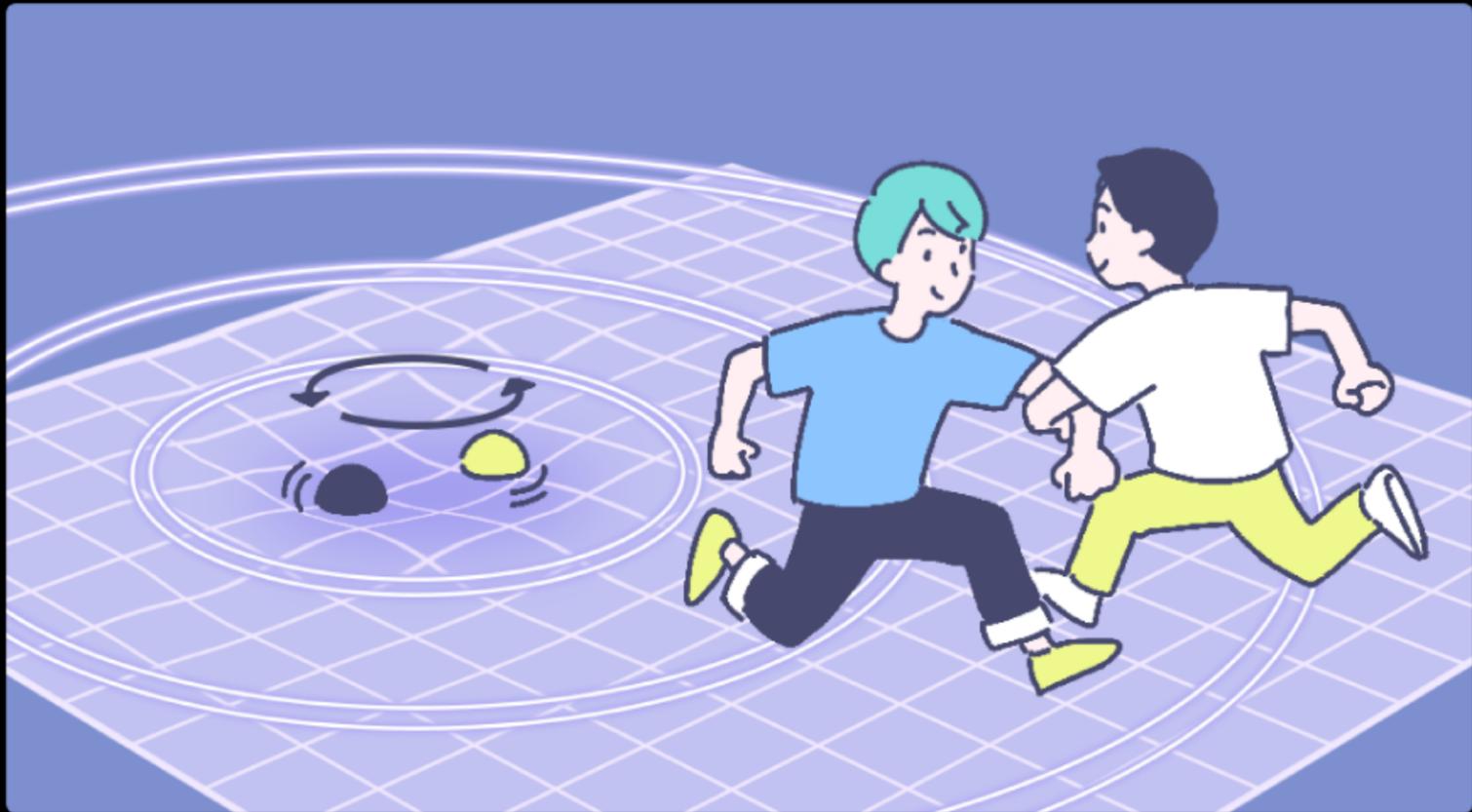
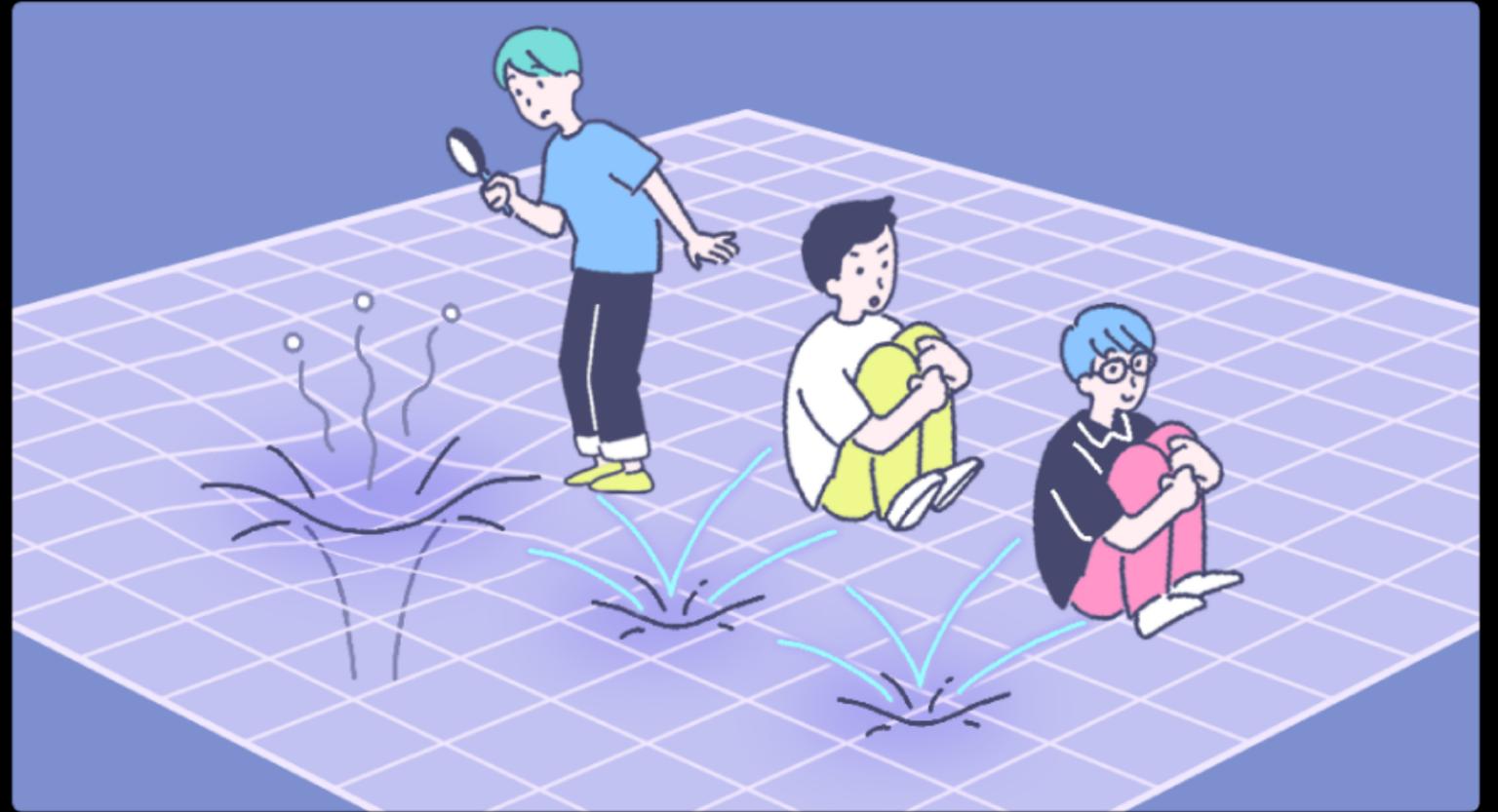
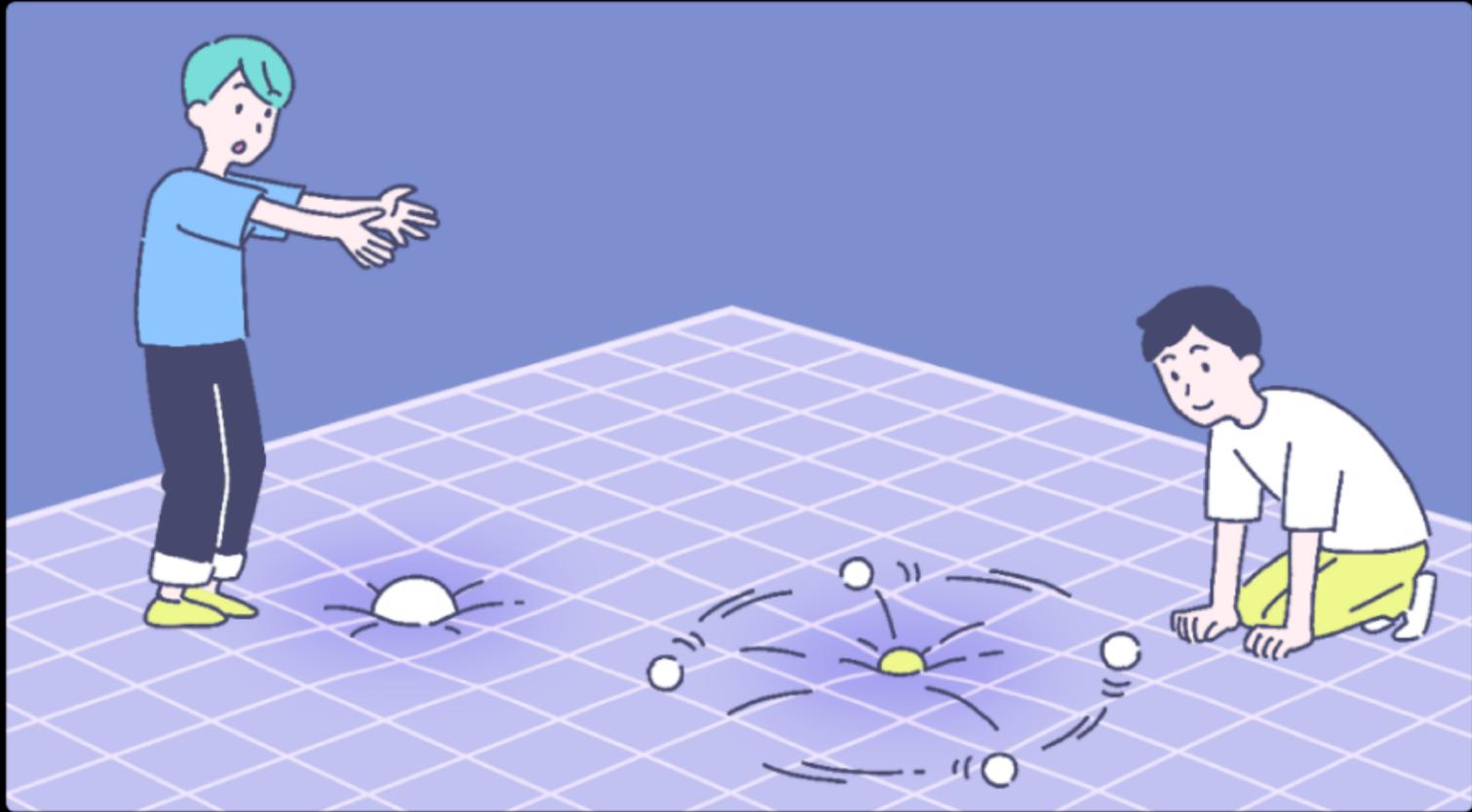
重力波観測は物理学から天文学へ

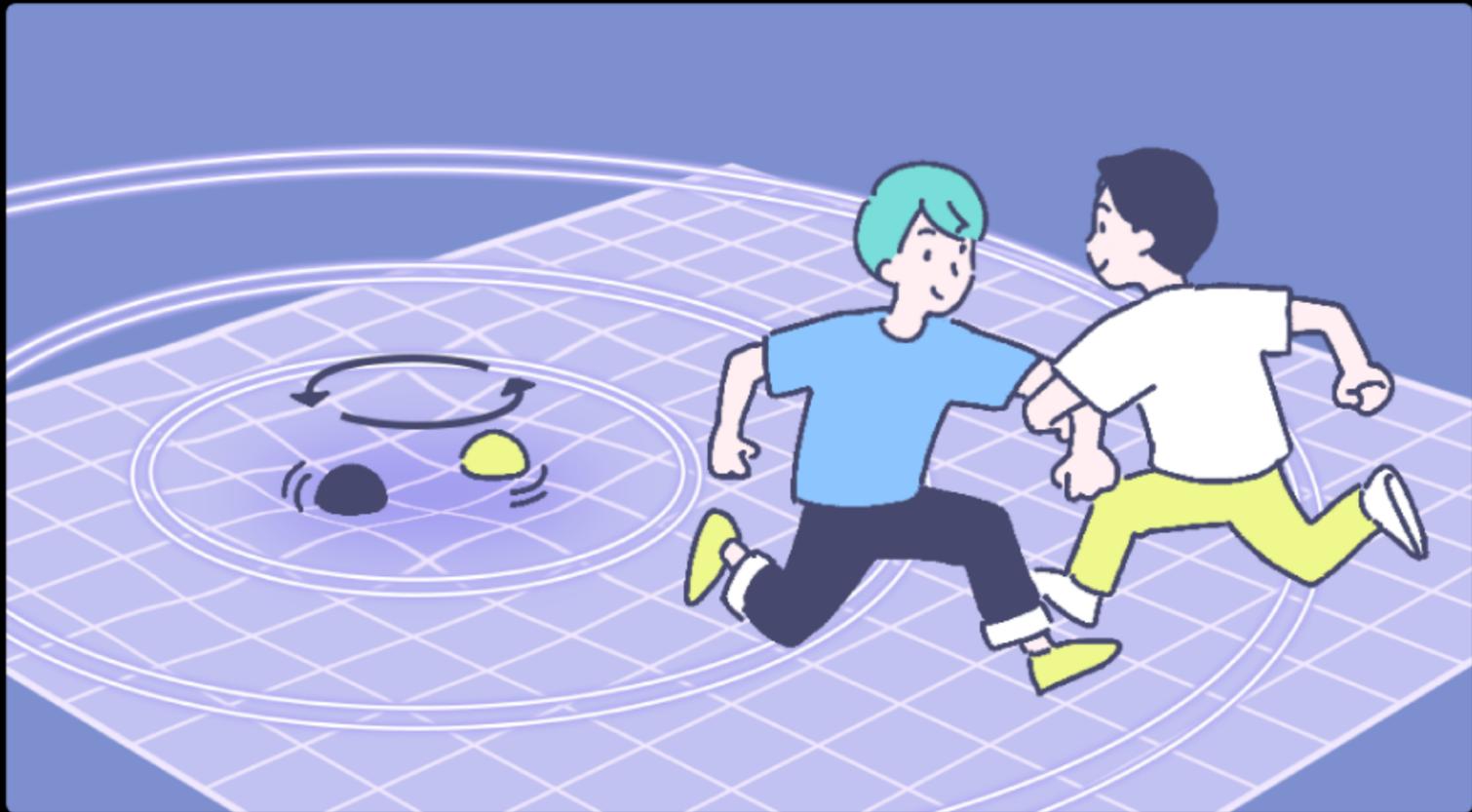
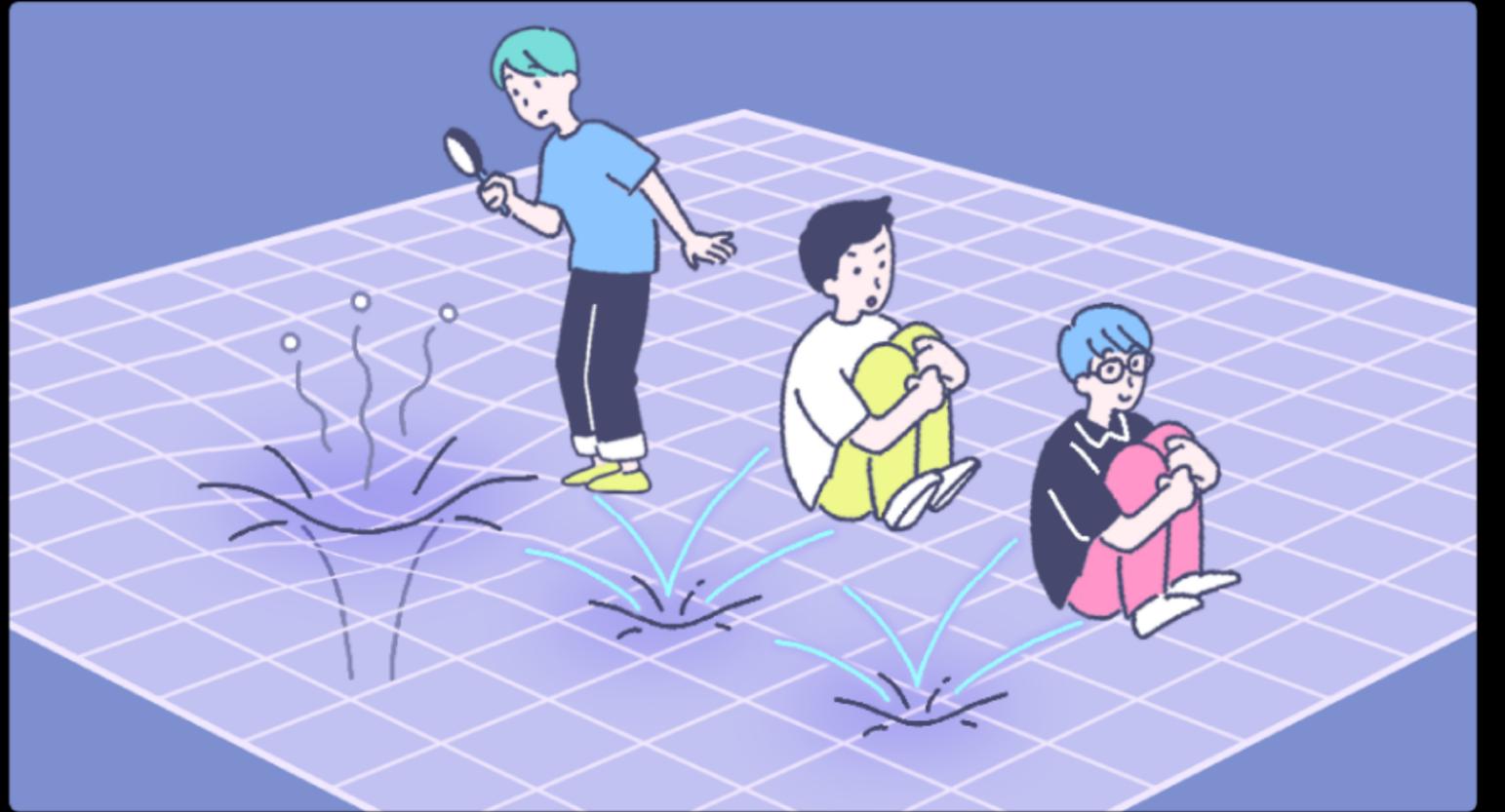
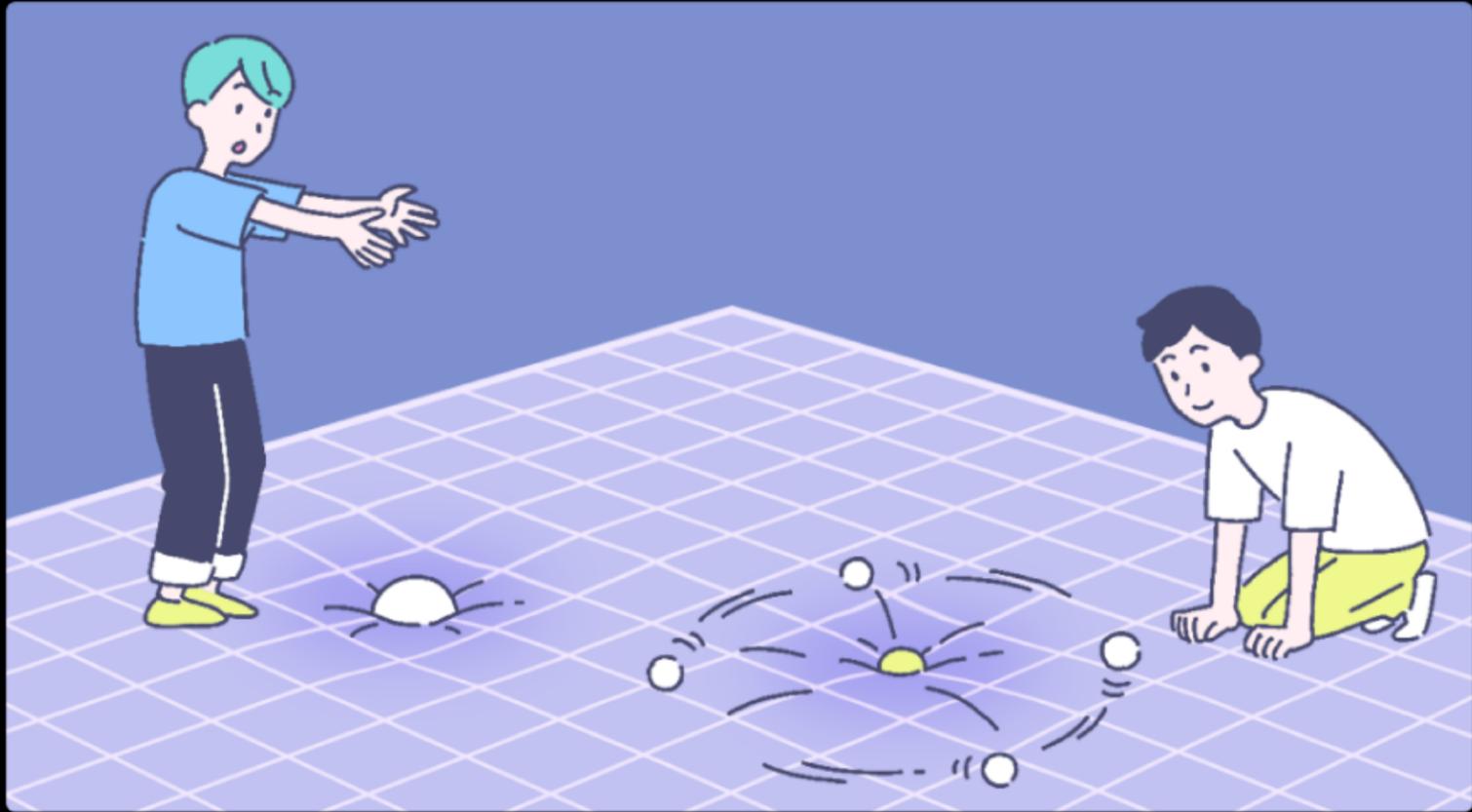
1. アインシュタインの相対性理論
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わかったこと, わからないこと
6. 将来計画

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



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





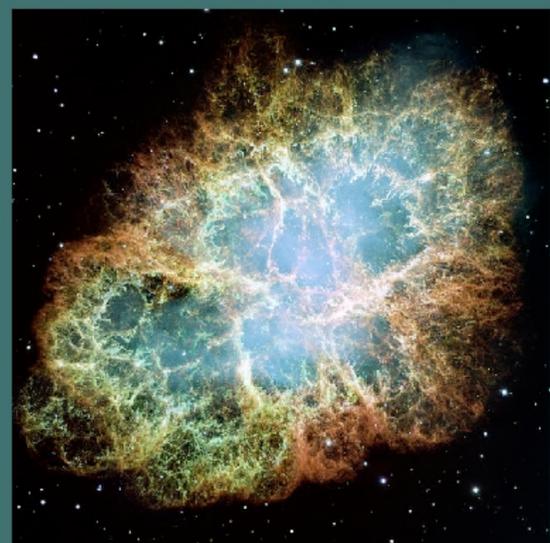


重力波の波源

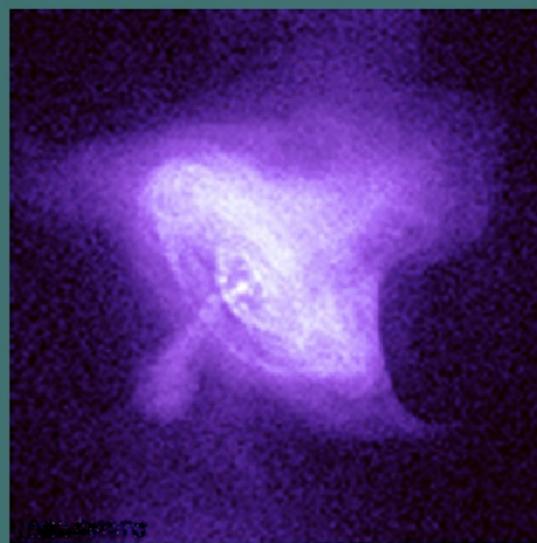
sources of gravitational wave

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

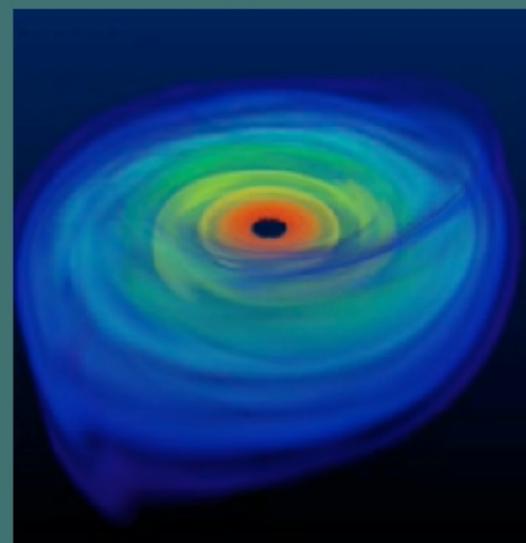
超新星爆発 (写真出典: NASA)



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

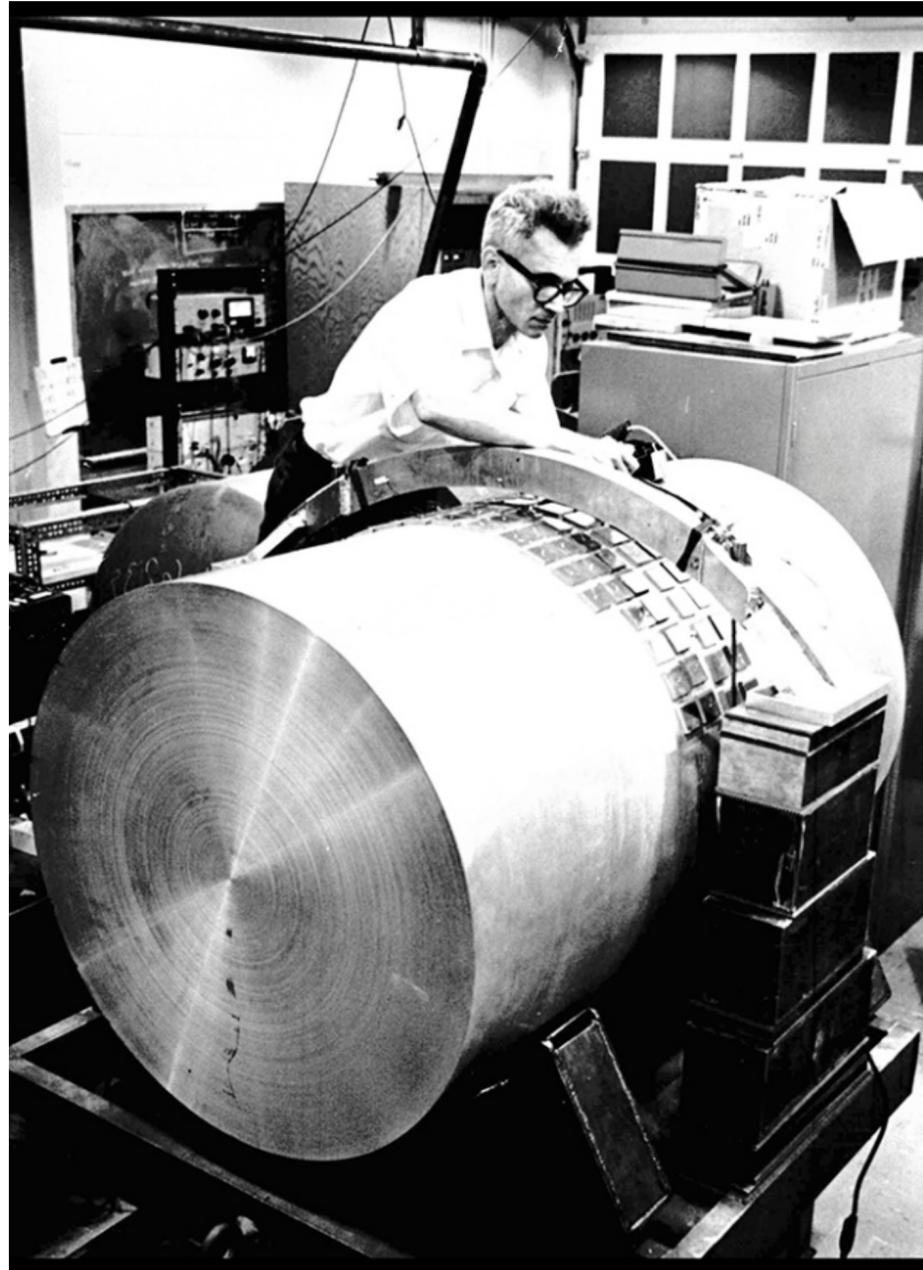
振幅が小さい

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

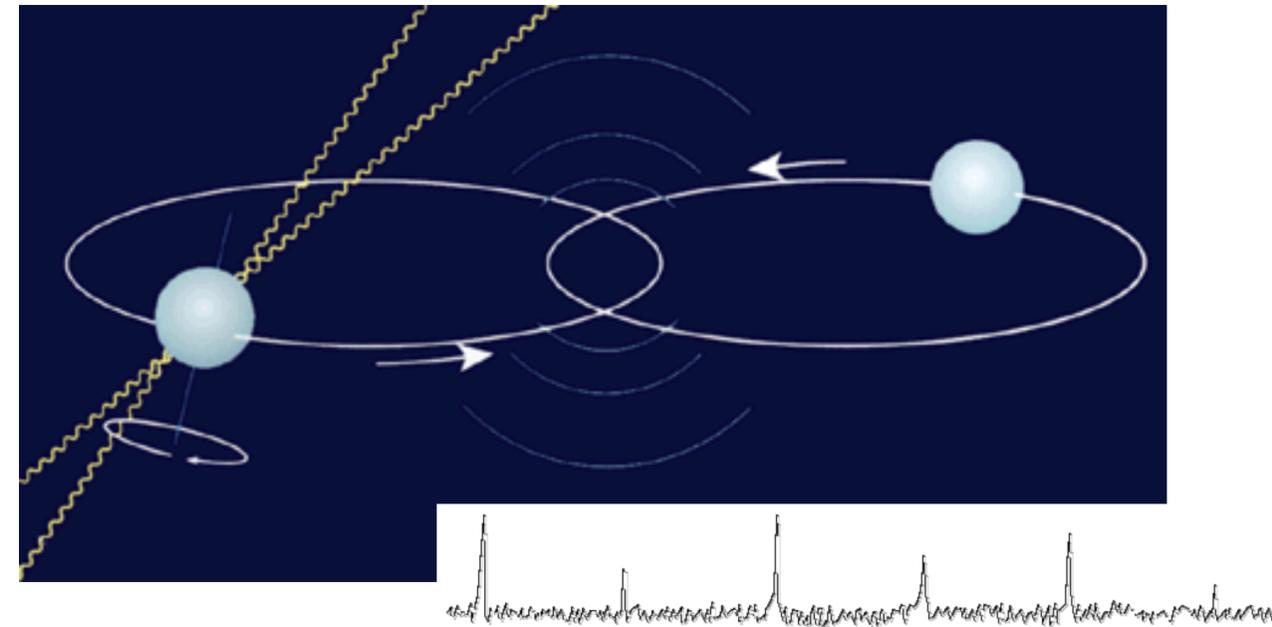
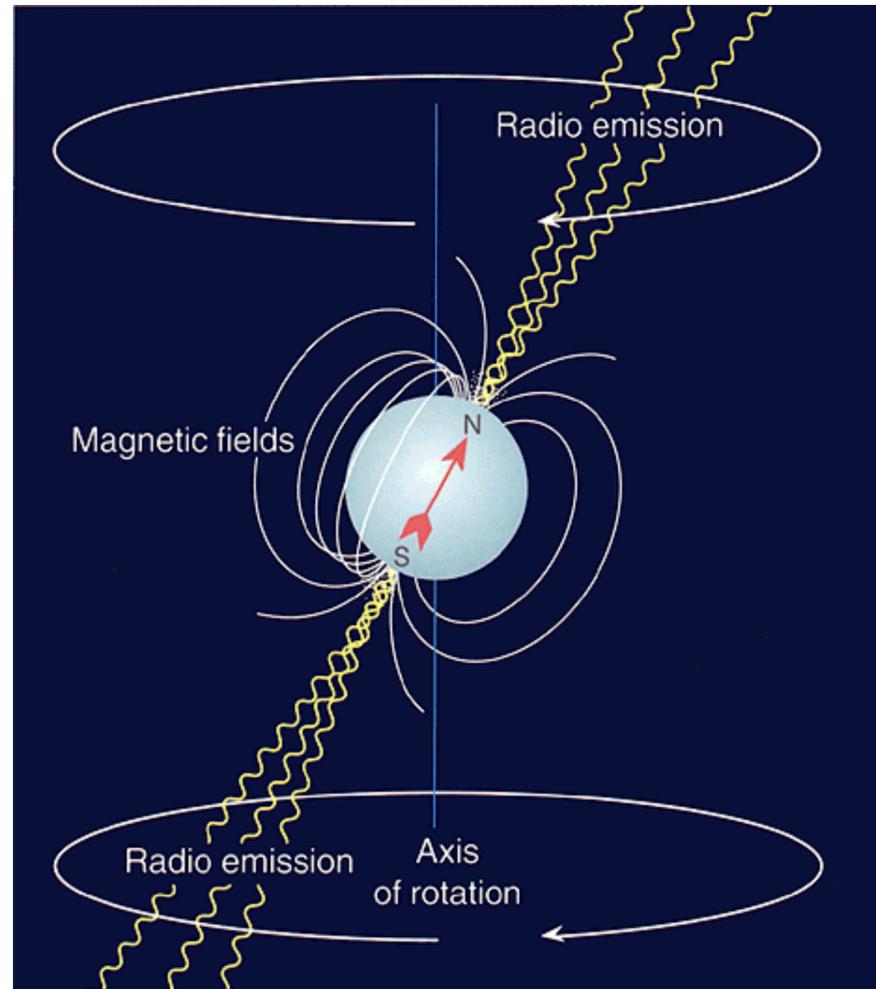
Joseph Weber (pictured), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that 'rang' when it was 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」

と発表したか、他のグループで追試されず.

連星中性子星の発見 (1974)

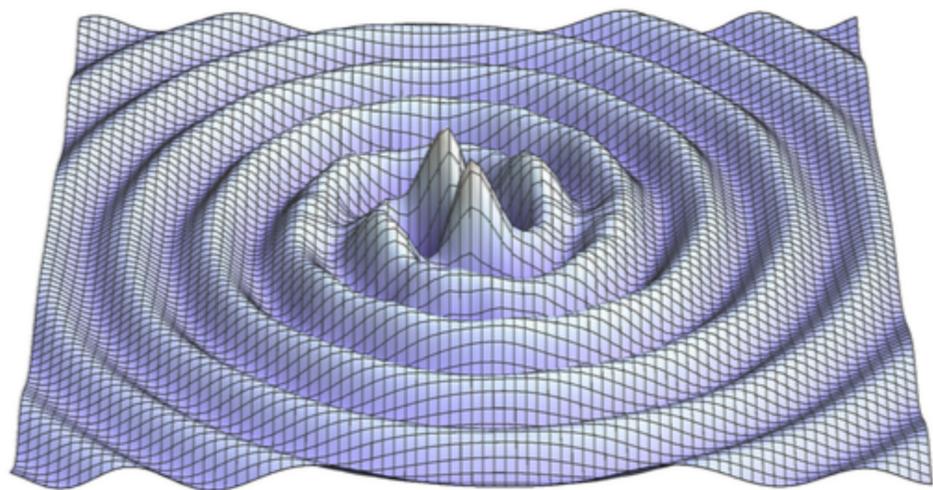
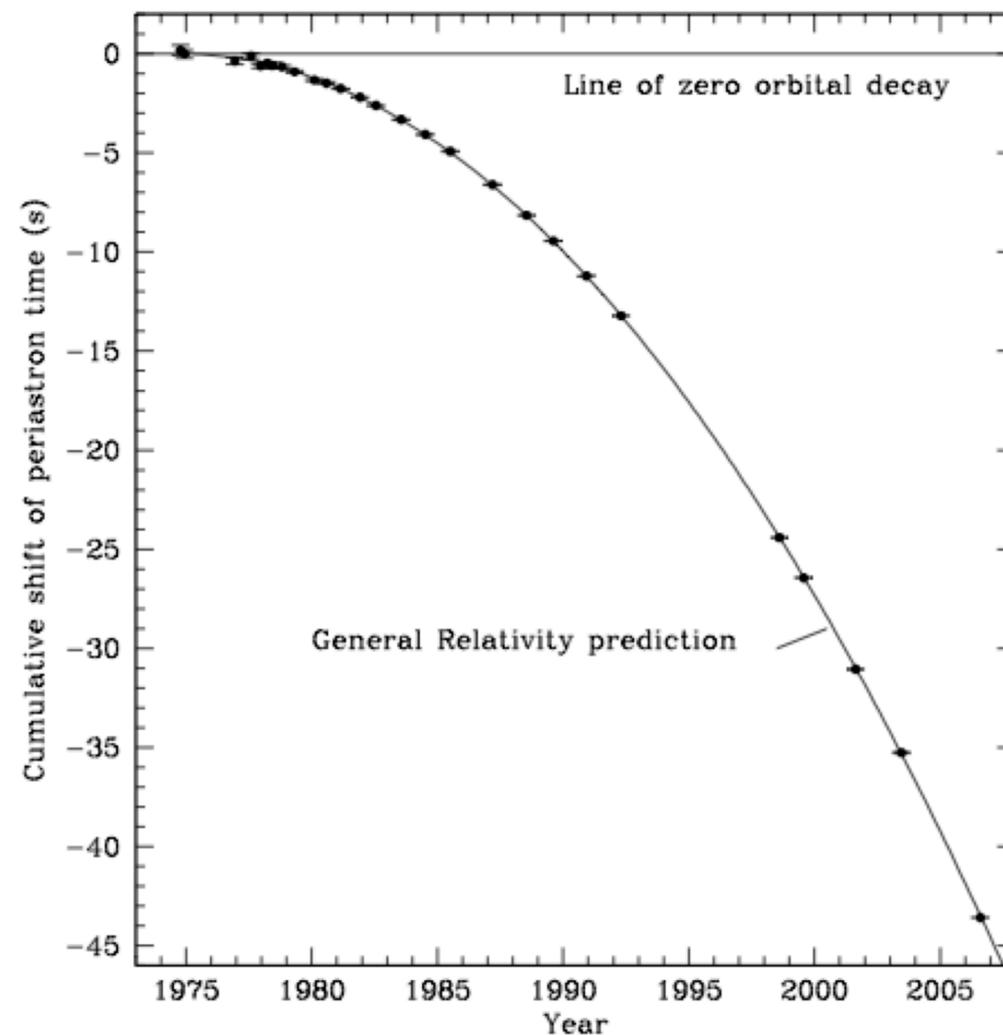
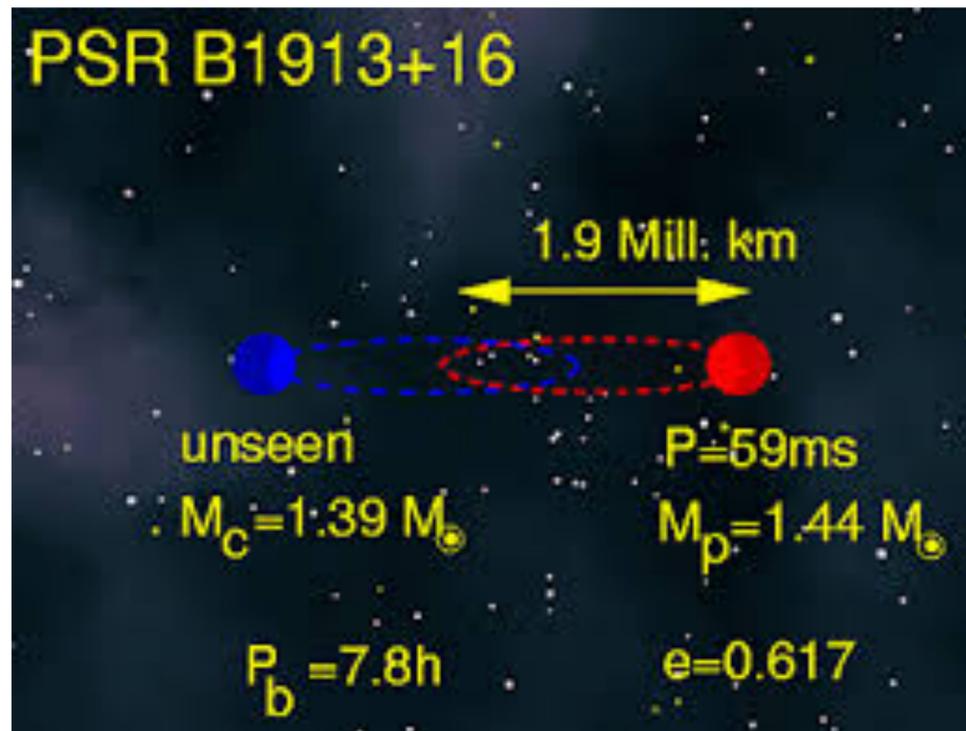


Arecibo, Puerto Rico

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。**

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

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 25

The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse
Prize share: 1/2

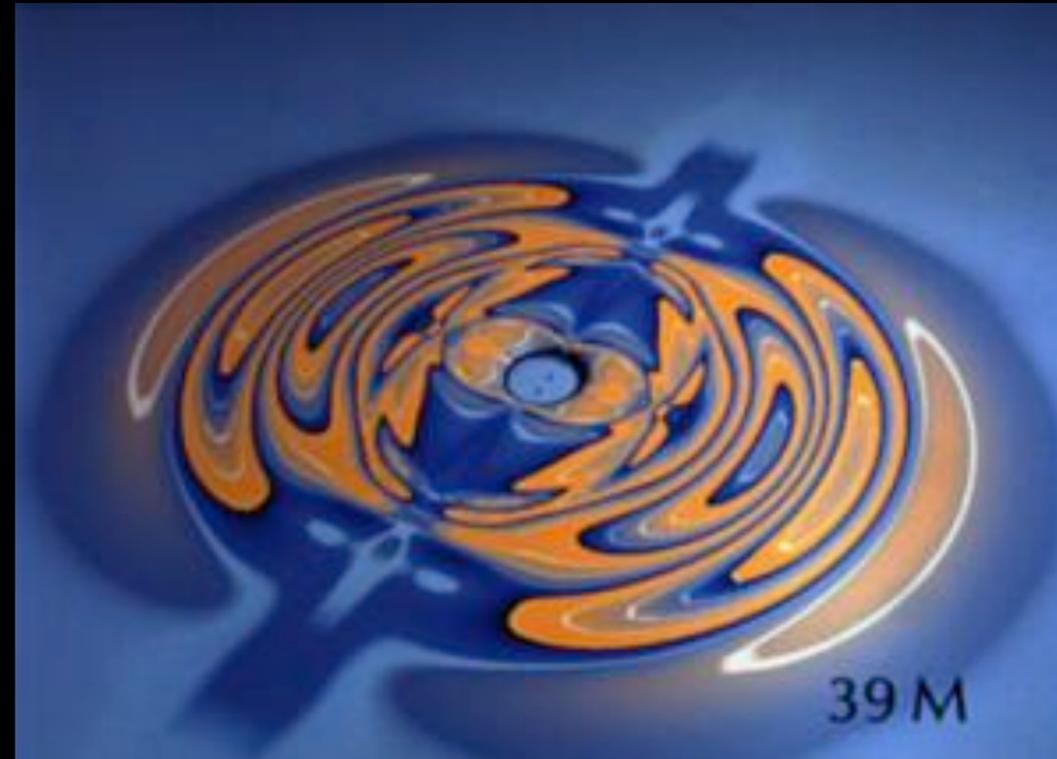
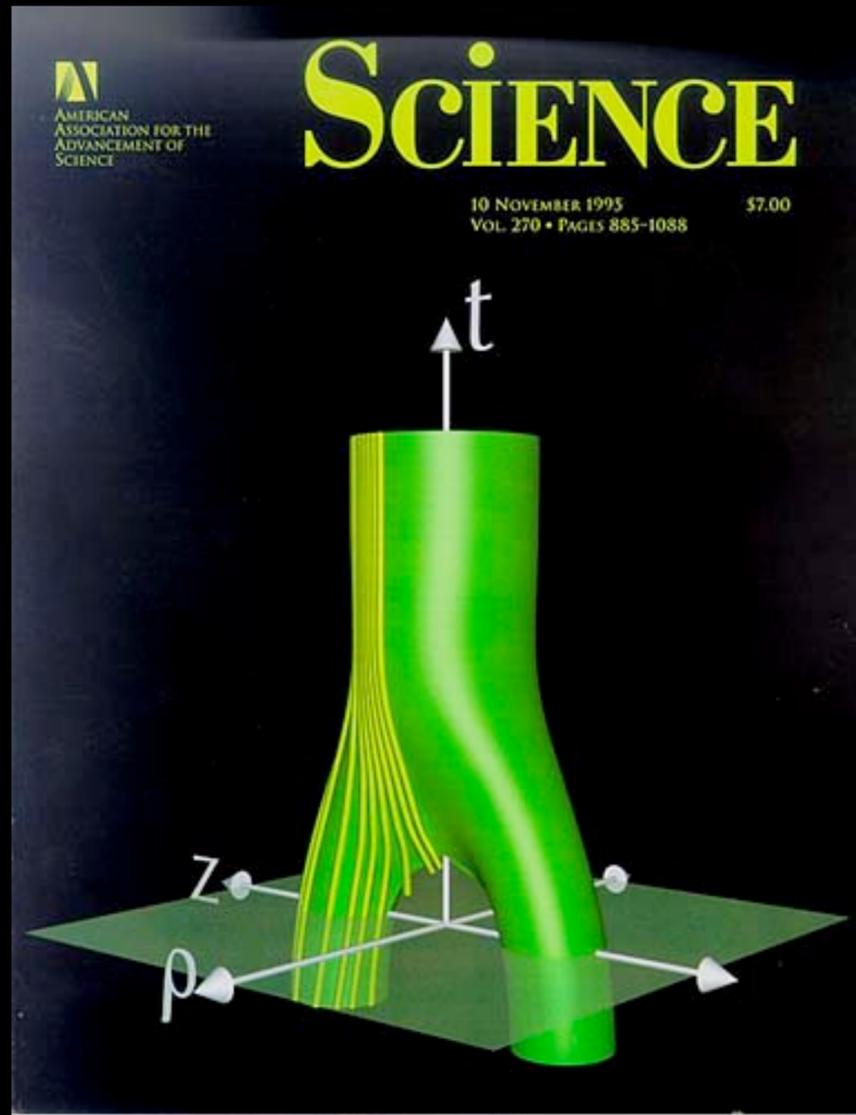


Joseph H. Taylor Jr.
Prize share: 1/2

”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”

ブラックホール合体と重力波放出のシミュレーション (1990年代-2000年代)



2つのブラックホールの合体と重力波放出
(1995年, NCSAグループ)

時間発展データから外向きの重力波を表現する方法は,
Gunnarsen-Shinkai-Maeda (94) の変換公式

シミュレーション研究は, なかなか難しかった.

* ブラックホールの取り扱い?

* 重力波への変換公式

* 初期条件, 境界条件の設定

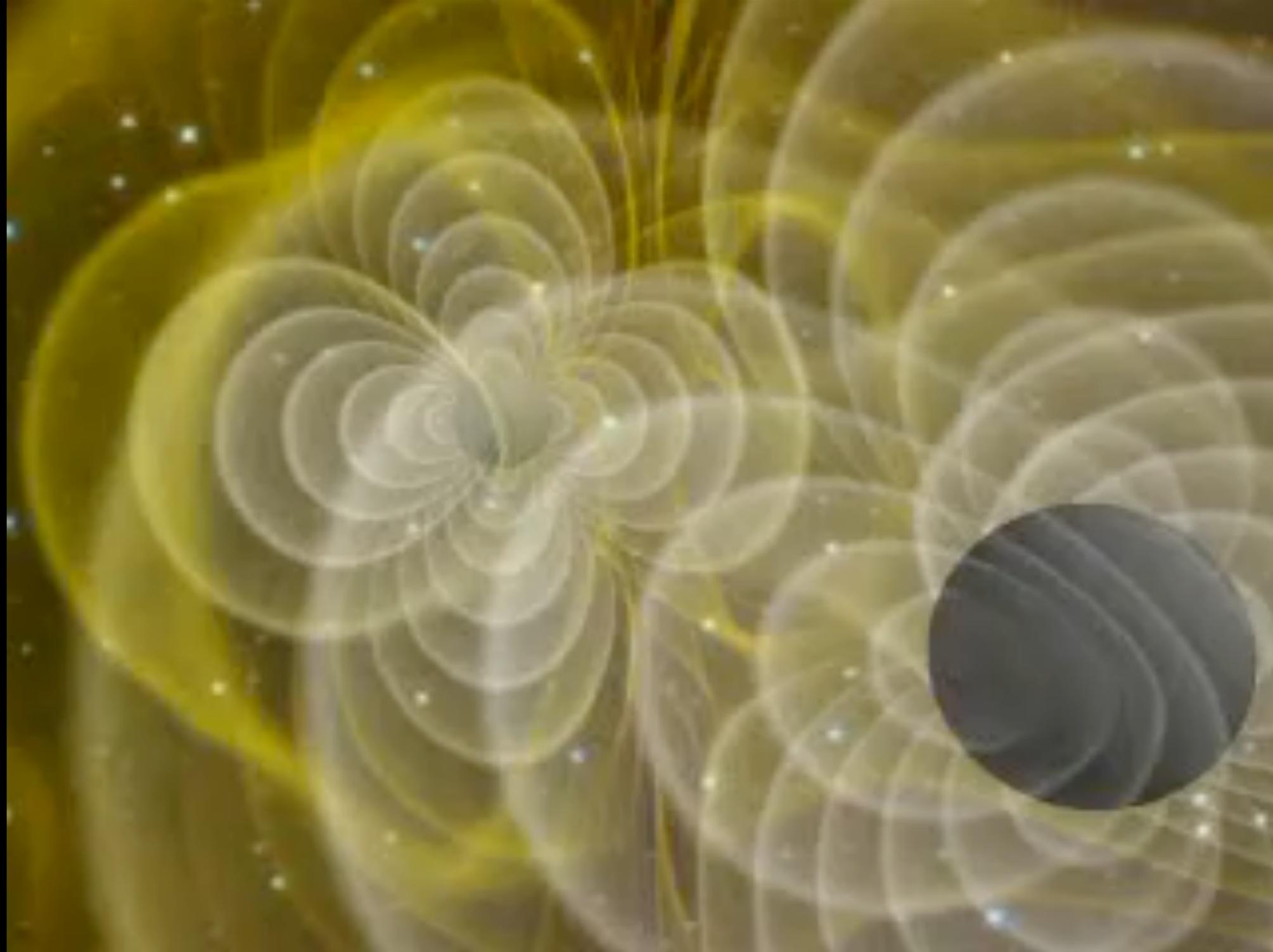
* 安定な定式化問題

* 解像度

* スーパーコンピュータ

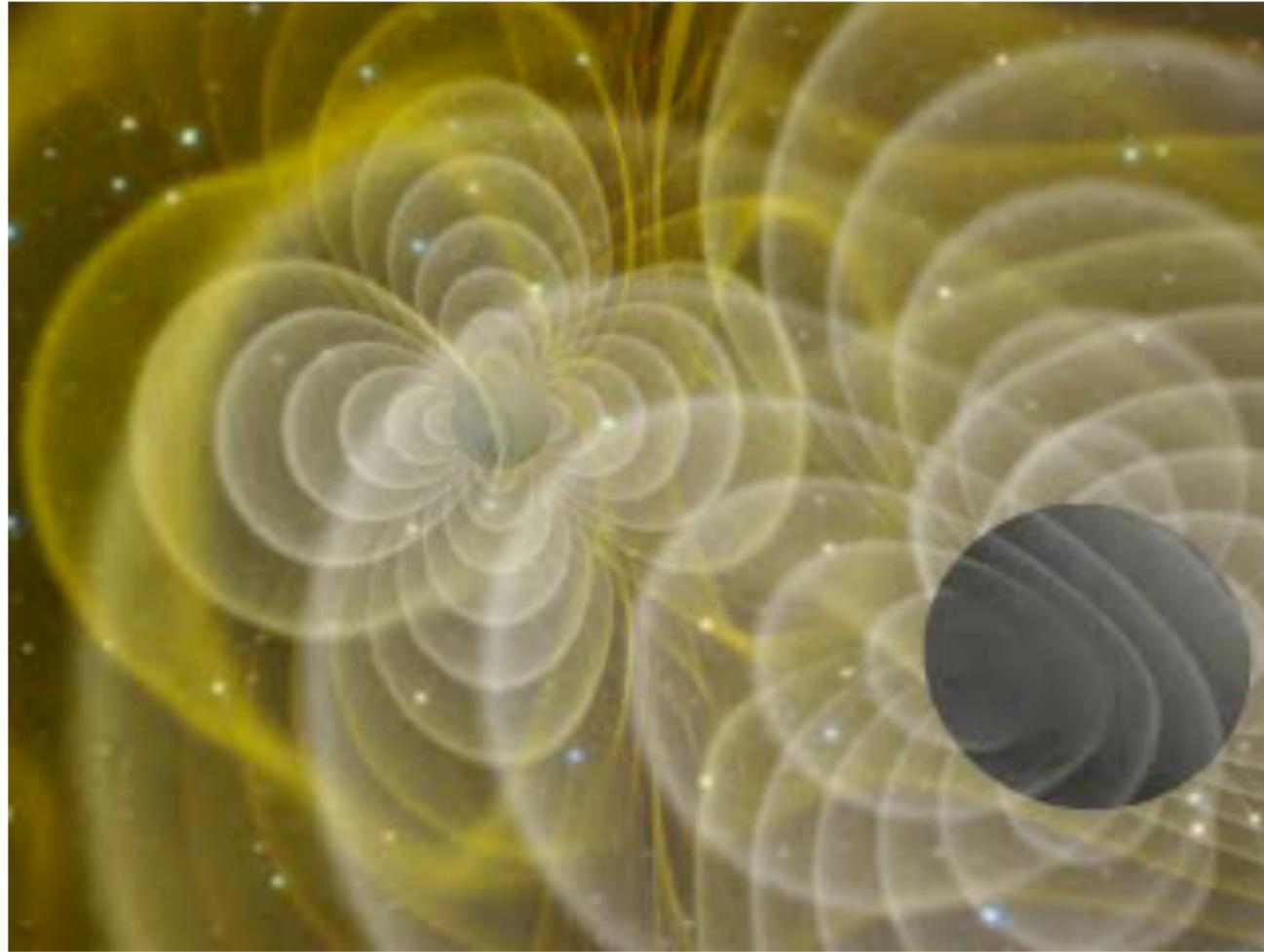
.....

ブラックホールの合体シミュレーション

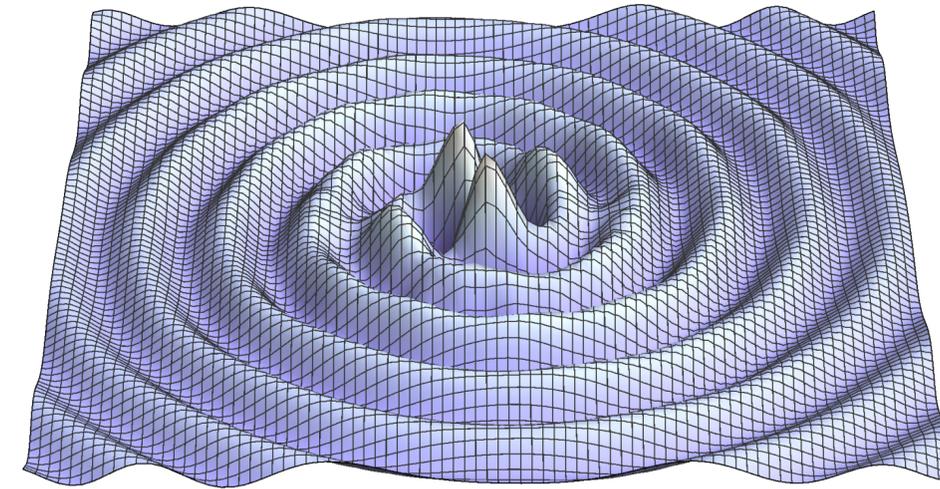


NCSA-AEI group (1998)

連星合体からの重力波の波形(理論予測)



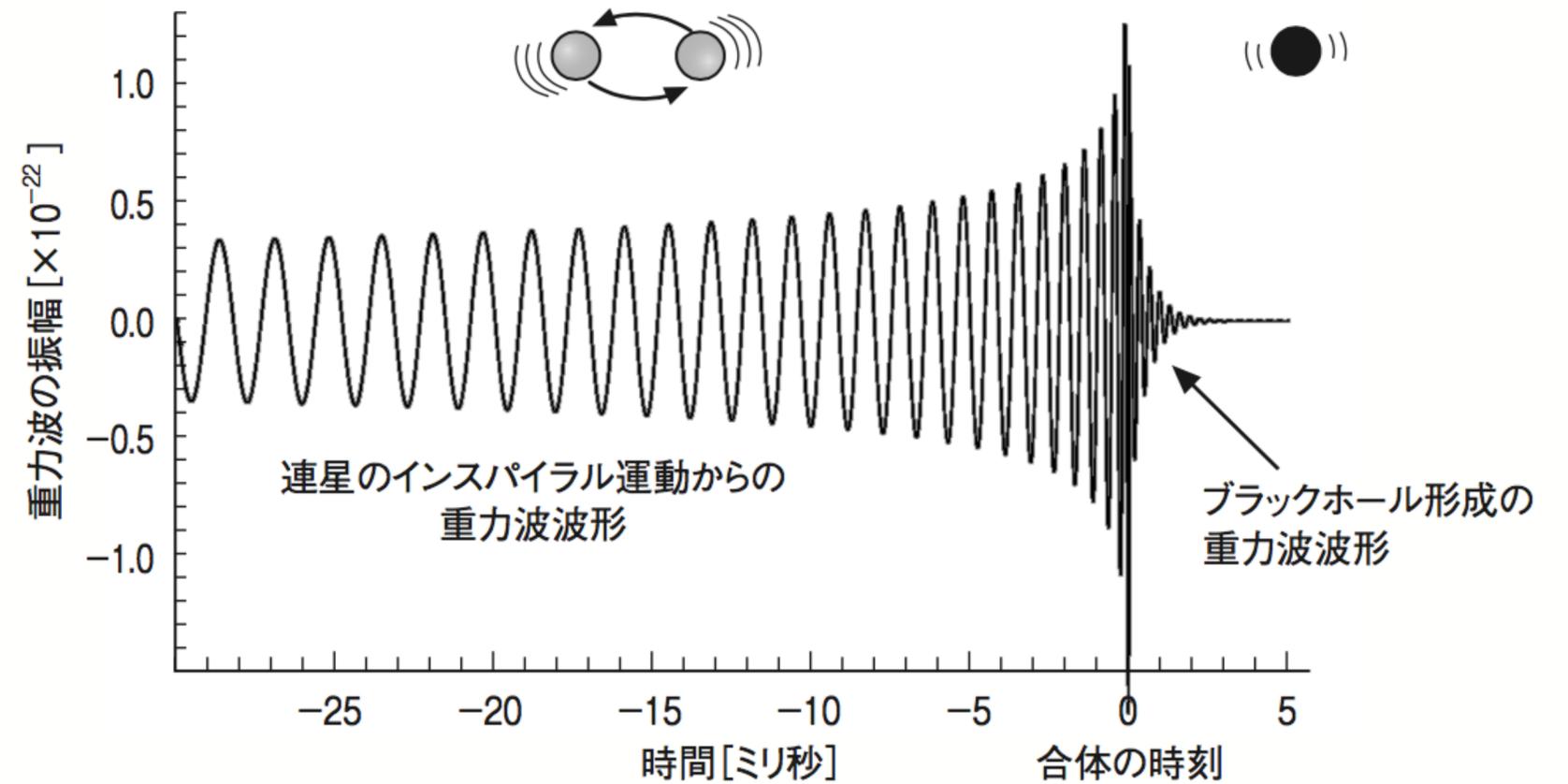
(NCSA-AEIグループ, 1998年)

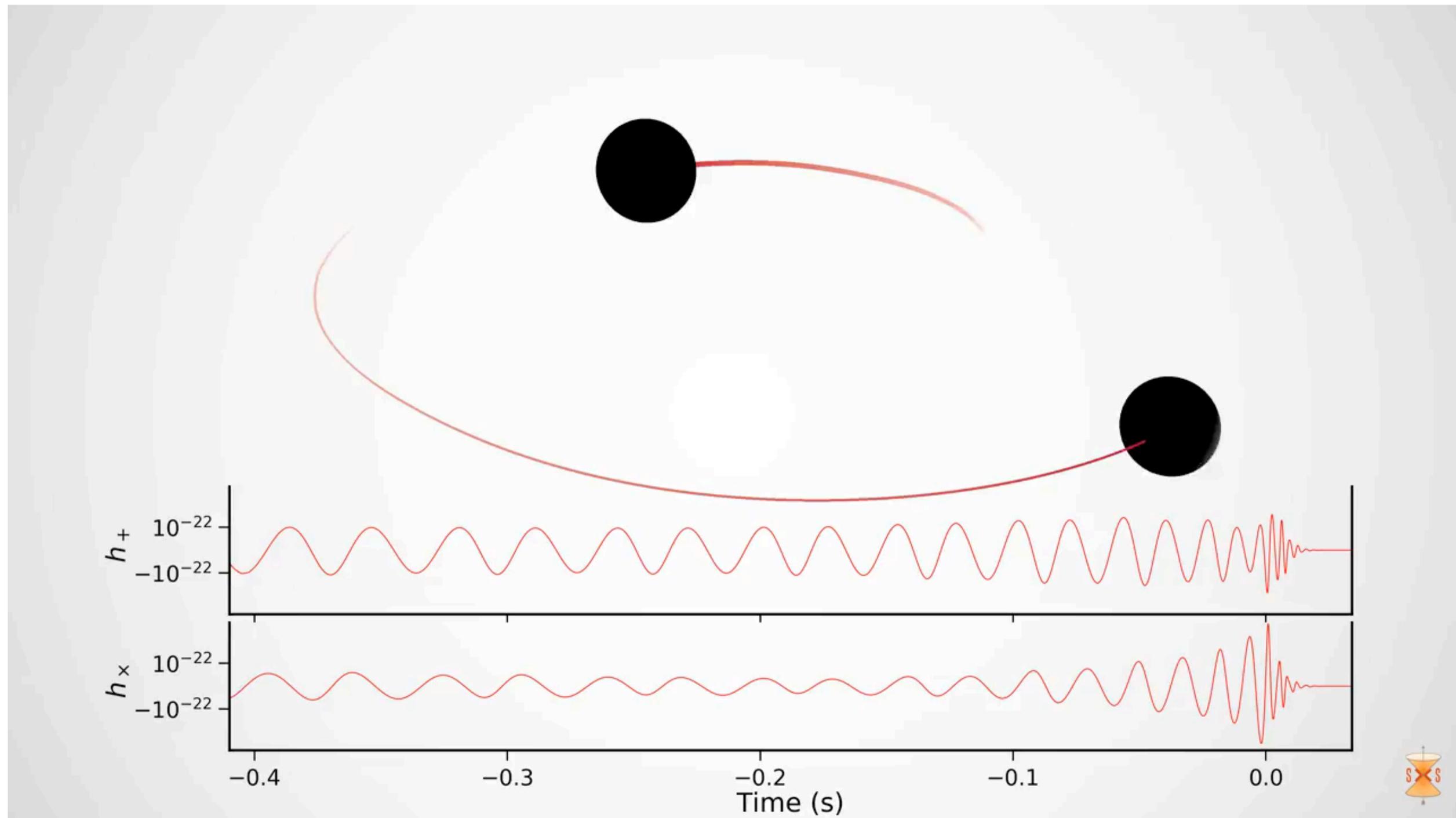


Inspiral

Merger

Ringdown

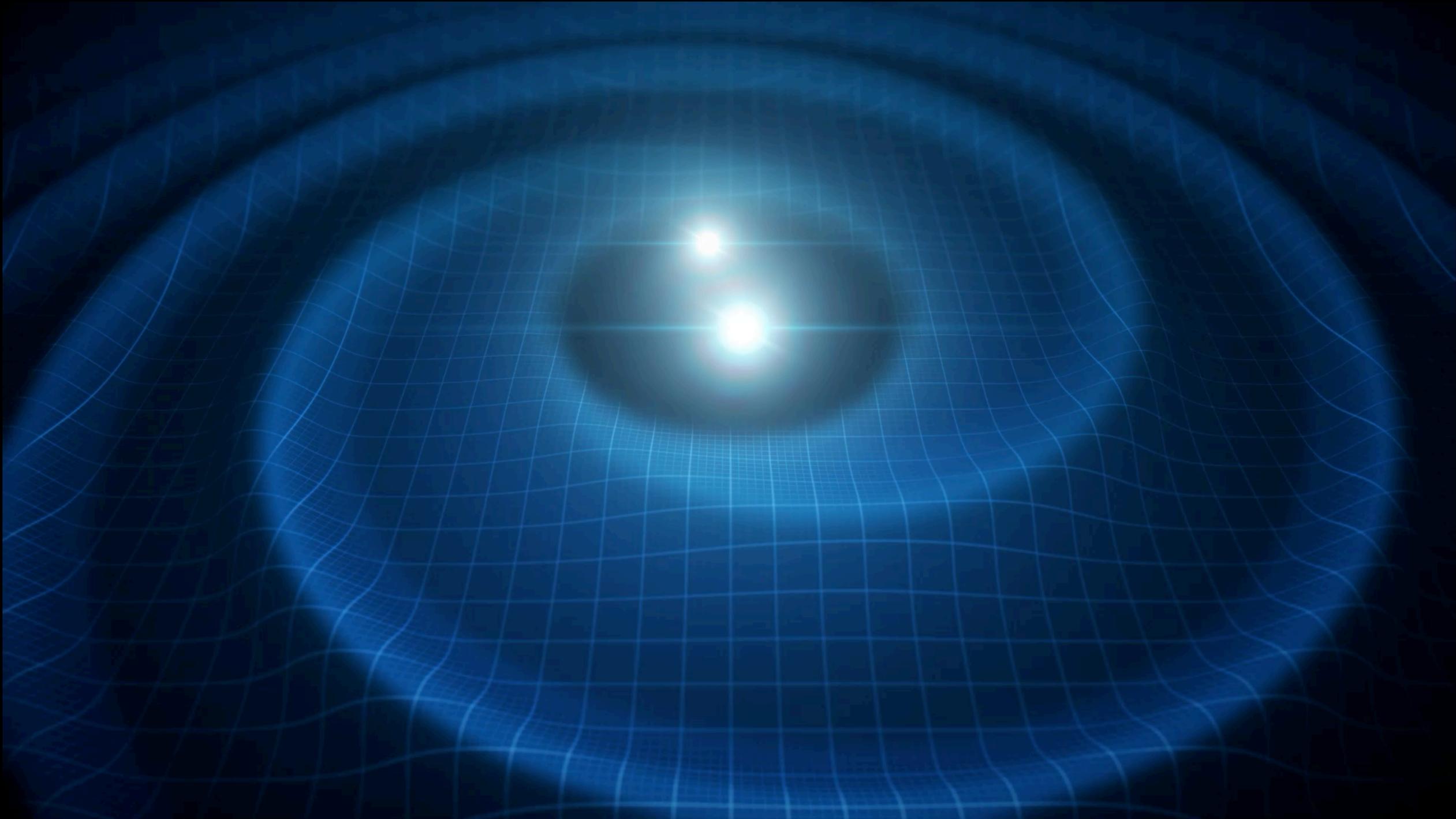




Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown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



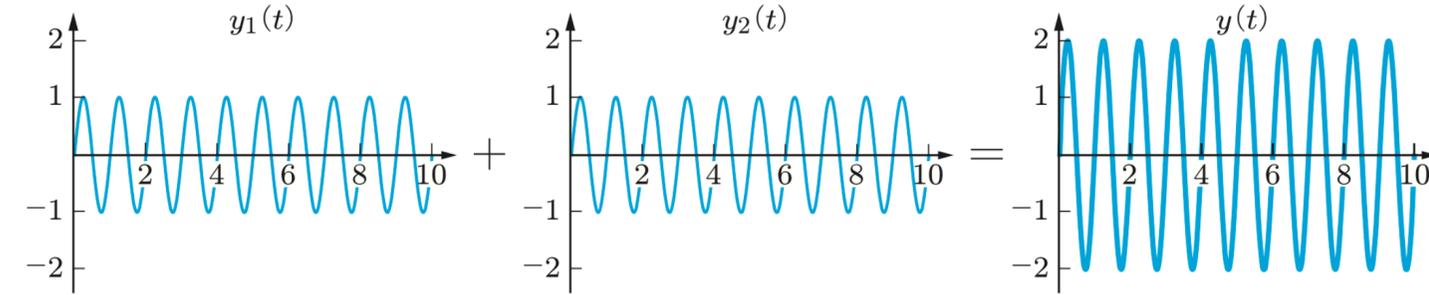
レーザー干渉計のしくみ： 干渉とは

干渉＝波が重なって強めあったり弱めあったりする現象

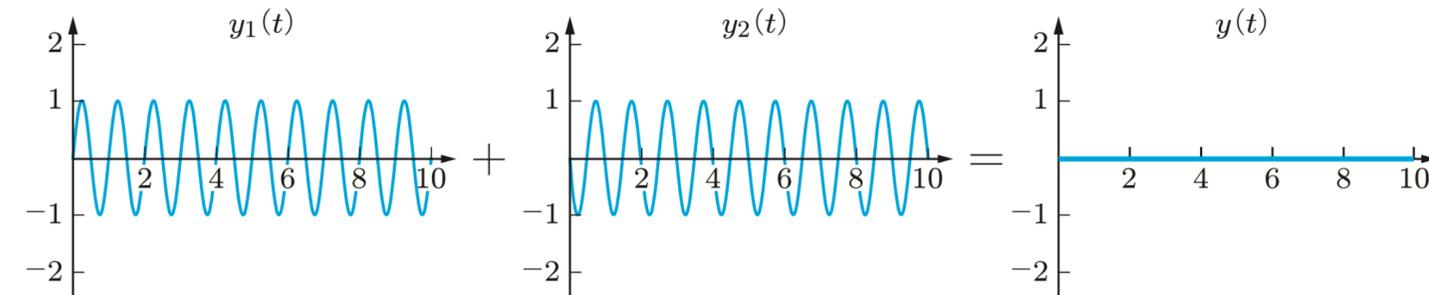
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO,らいご)



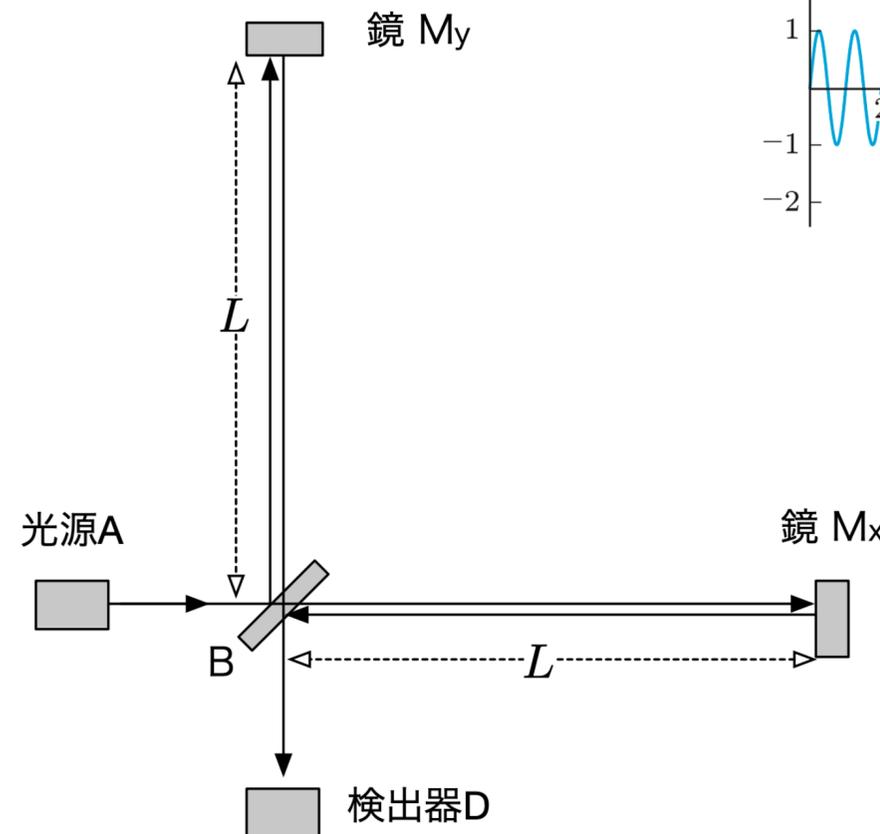
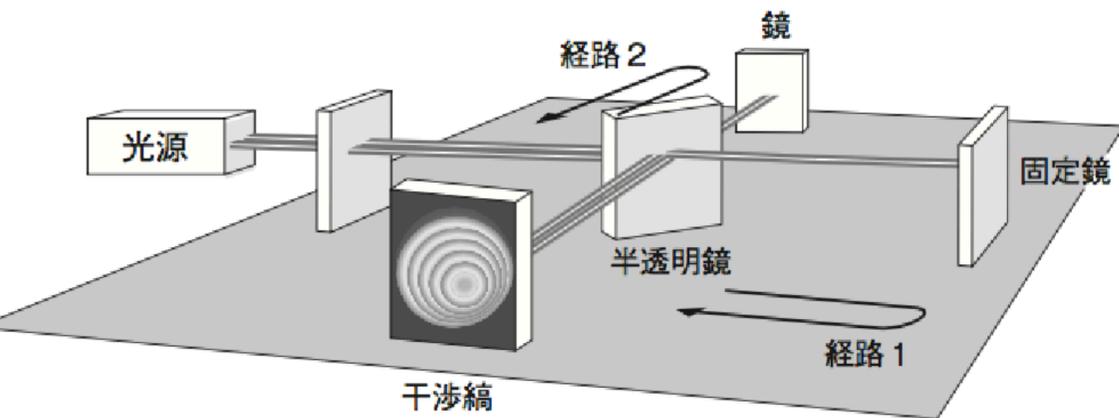
<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



山＋山＝強めあう



山＋谷＝弱めあう



レーザー干渉計のしくみ

Michelson Interferometer

MIT Department of Physics
Technical Services Group

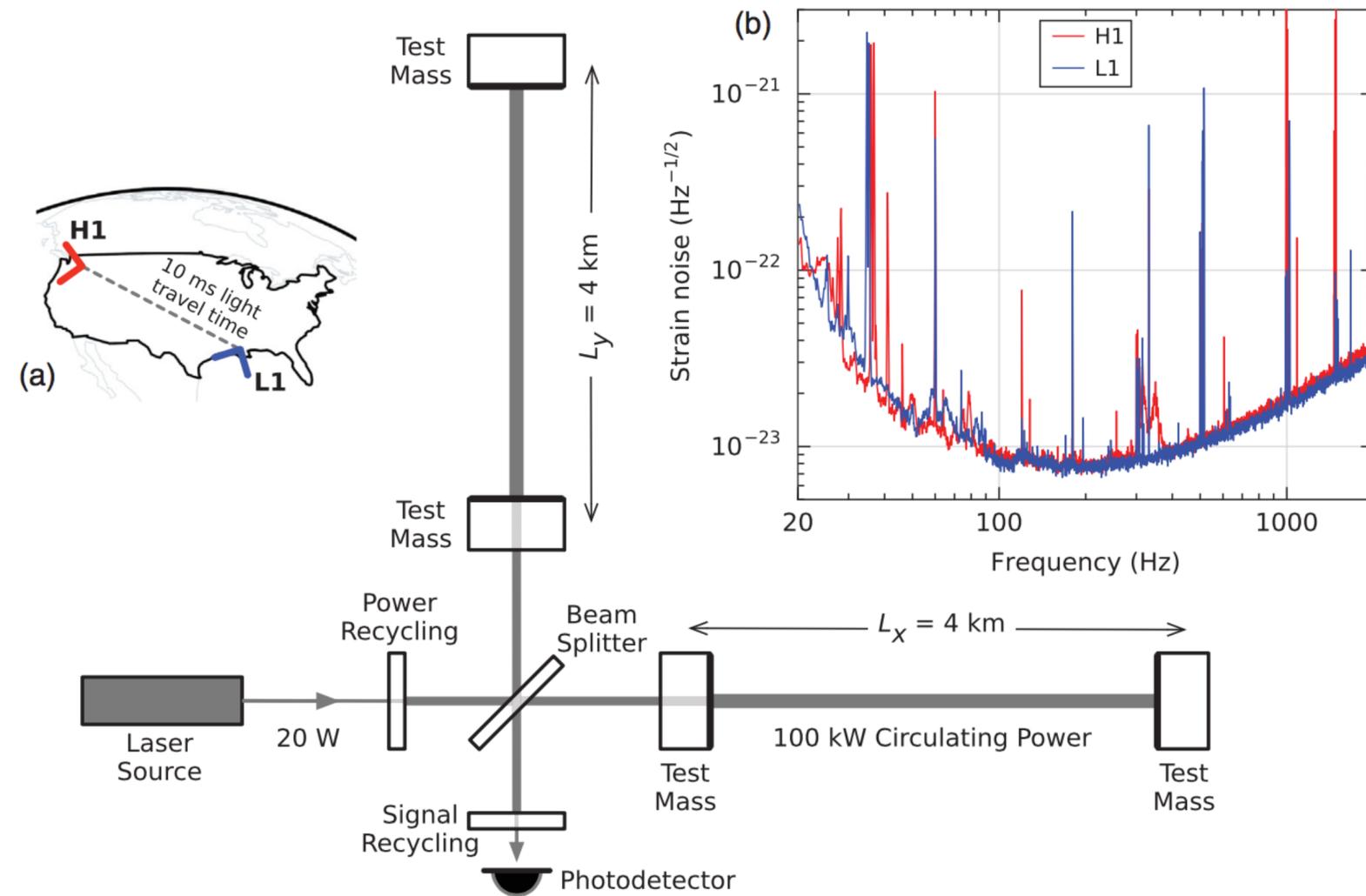
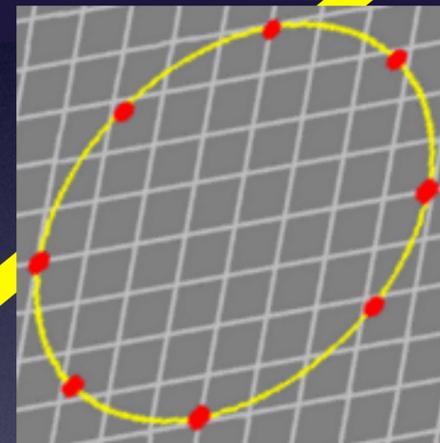
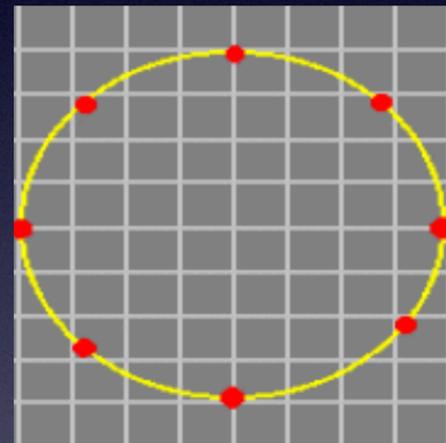
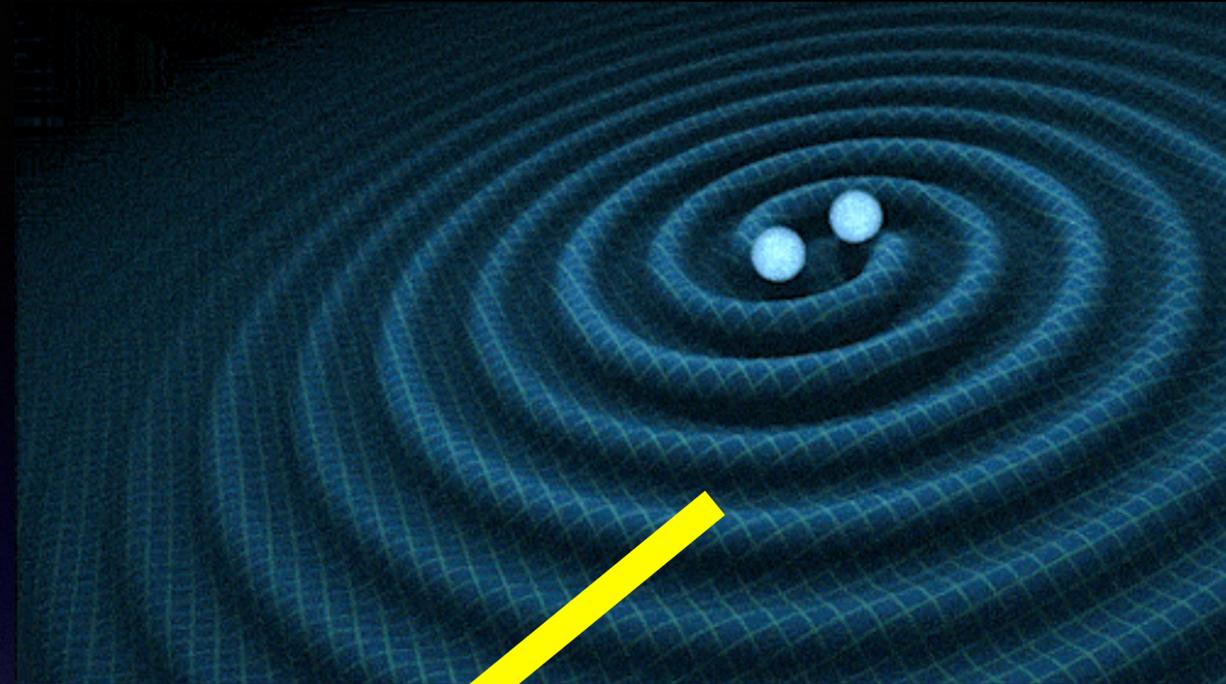


FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the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

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



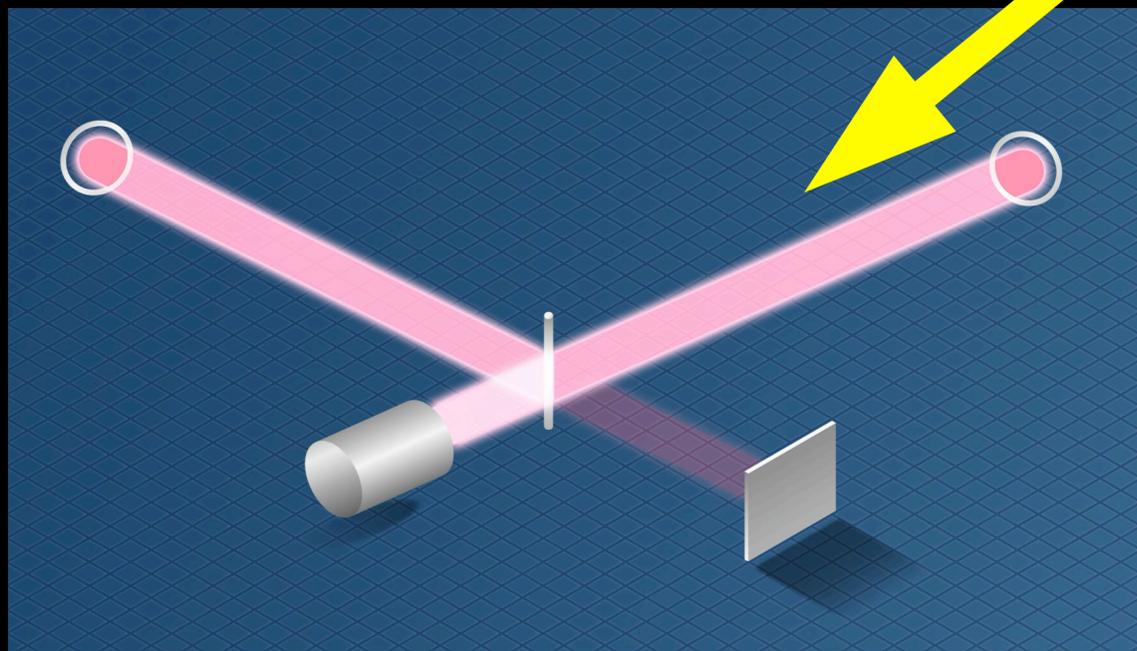
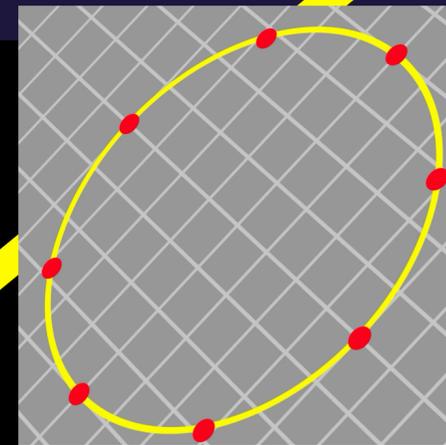
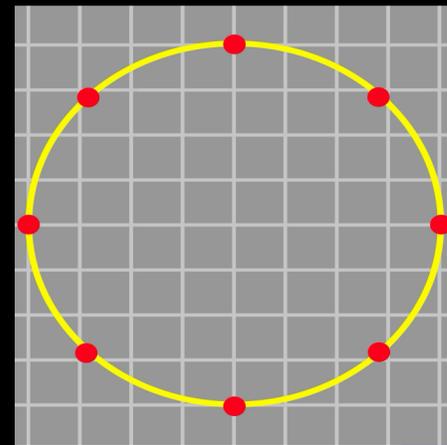
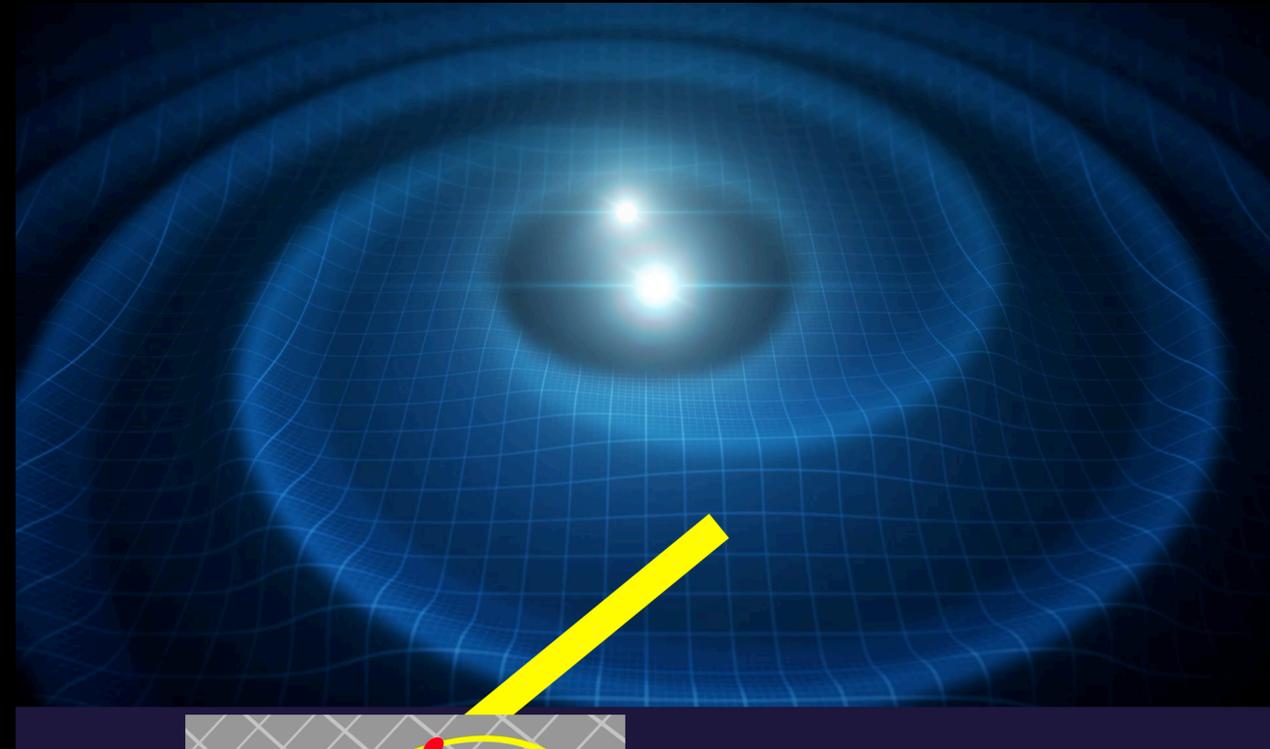
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

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



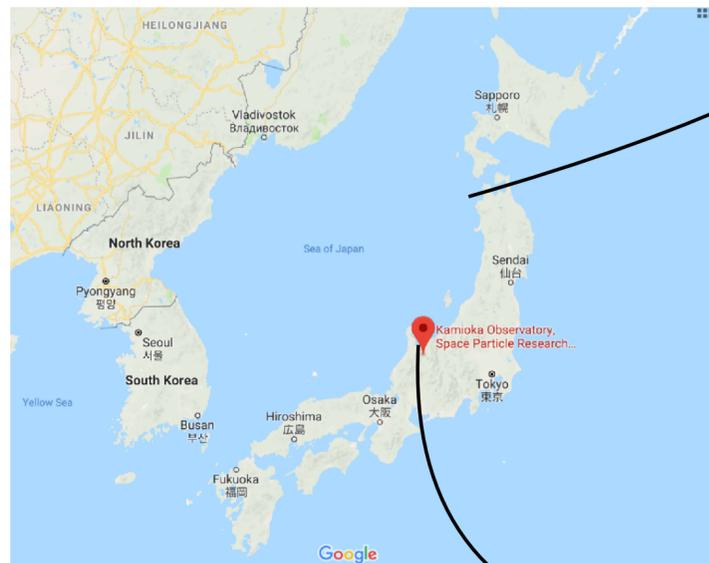
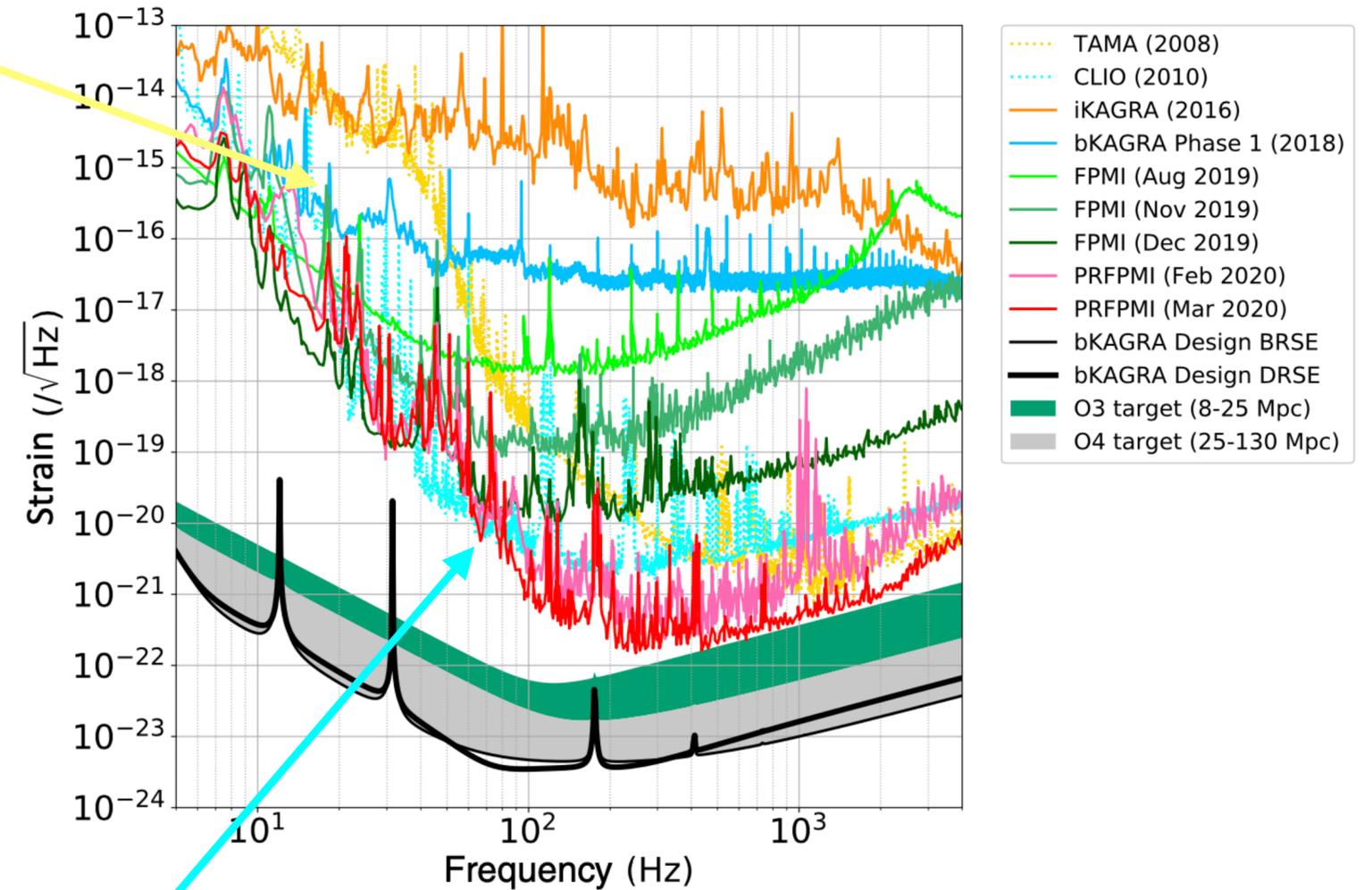
レーザー干渉計

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

TAMA 300 m (国立天文台, 東京三鷹, 2008)



CLIO 20 m (岐阜県神岡, 2010)

KAGRA 3km (岐阜県神岡) 2011予算承認

重力波観測は物理学から天文学へ

1. アインシュタインの相対性理論
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わからないこと
6. 将来計画

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



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

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>

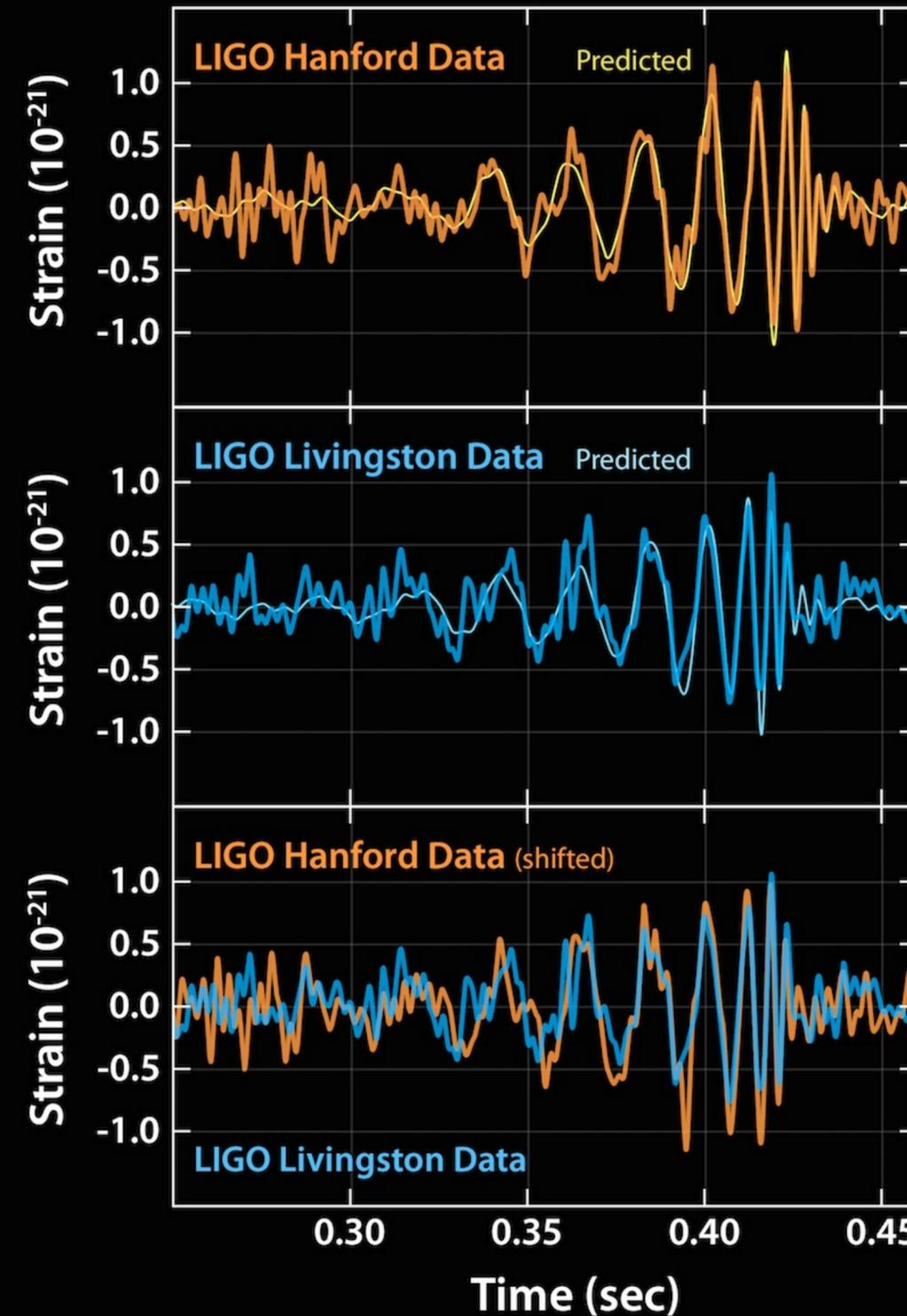
2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



四国新聞だけ
ちがった... 残念 (笑)

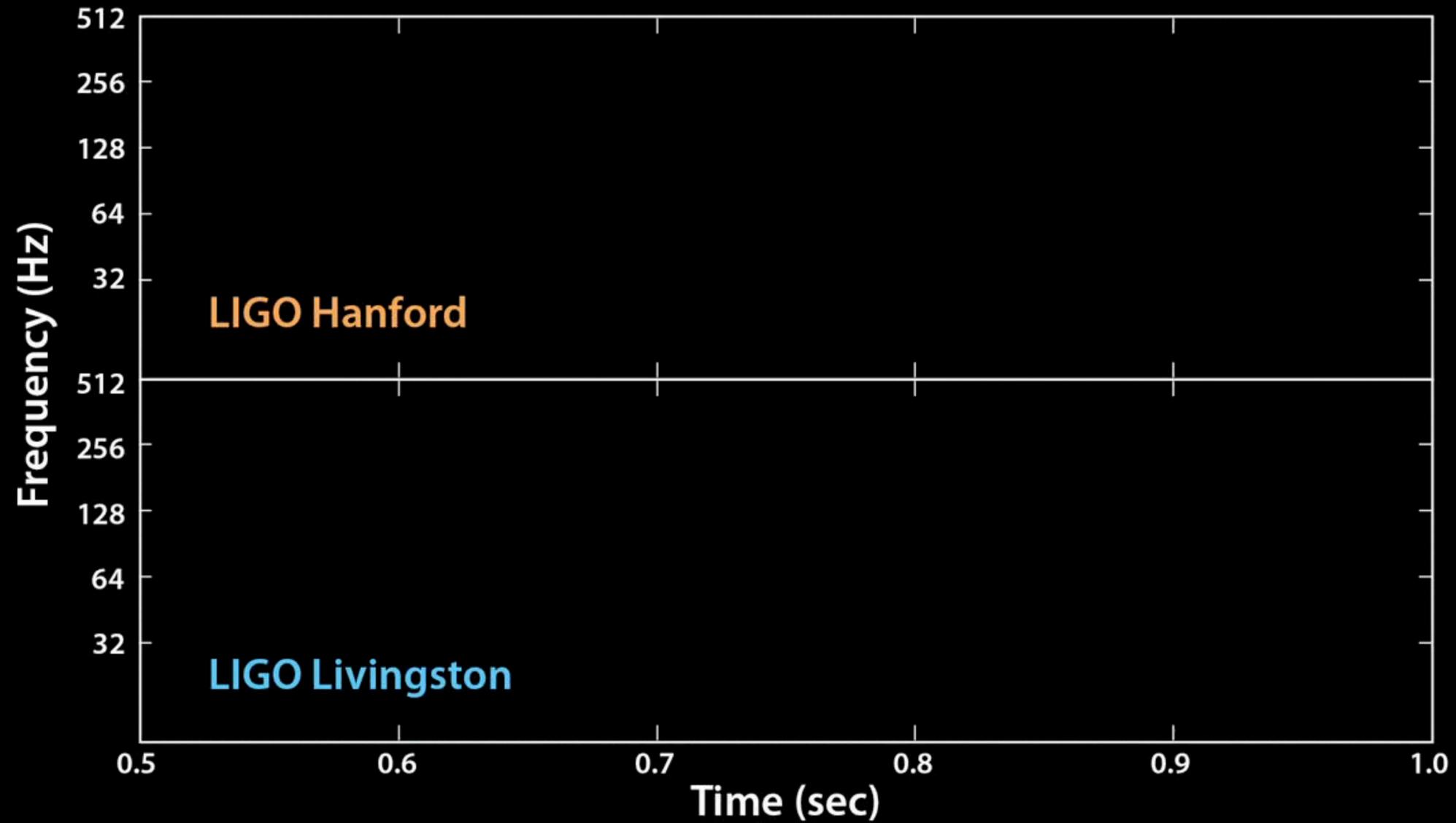
2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

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

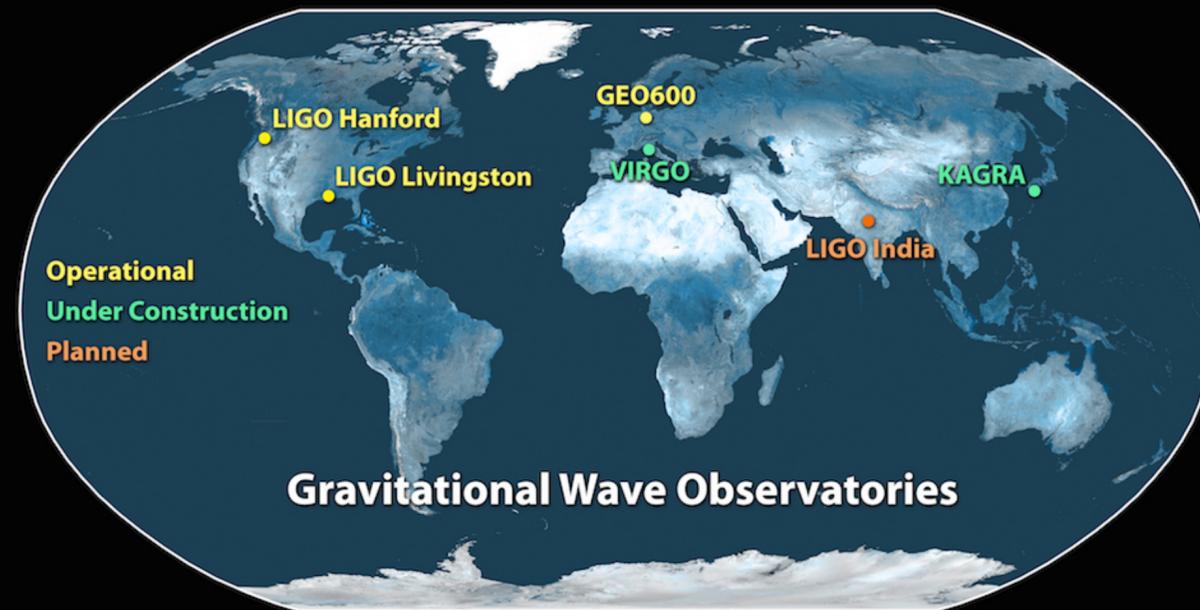
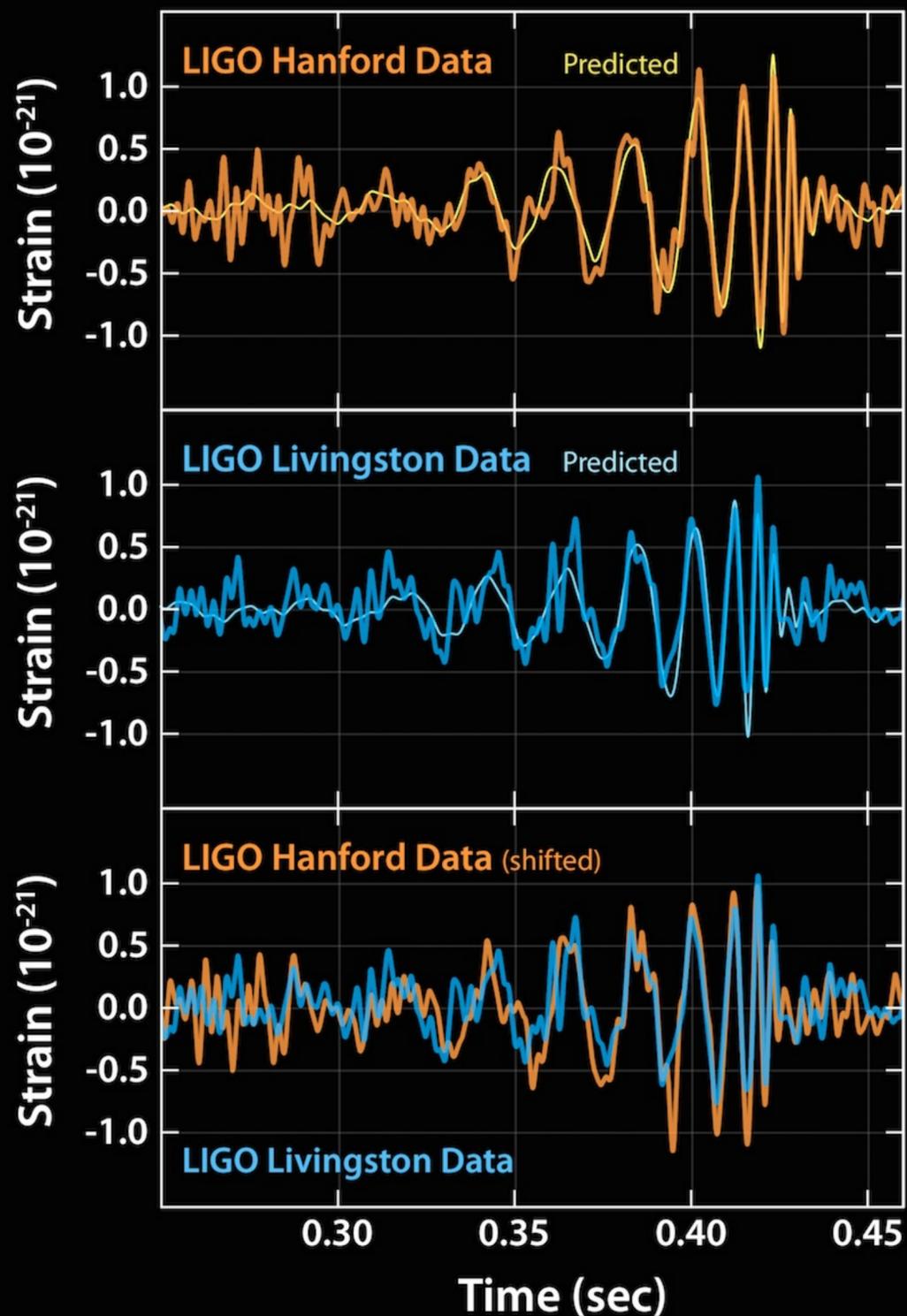
重力波波形を音にすると. . .



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

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と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1000人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【富山哲郎】



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

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。

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。

【富山哲郎】

観測

宿題だ。その日欧米では高出を狙ってき(永井理)

ブラックホール 解明に期待

重力波の大きな特徴はブラックホールからも放出されること。連星が合体してブラックホールが生まれ、瞬間を観測できると期待される。時間と空間をねじ曲げてすべてをのみ込むブラックホールは、光も電波も出さないため直接には観測



国際実験チーム「LIGO」の二つの重力波望遠鏡

カナダ
ワシントン州
米国
ワシントン州
ルイジアナ州
メキシコ
500km
※写真はLIGO提供

る精度を目指す。実現すれば七億光年の範囲にある連星からの重力波を捉えられる。一年で十回ほどキヤッチできる計算だという。

大阪工業大の真貝寿明教授(理論物理学)は「重力波を天文学に使うには、発生した場所を割り出す必要がある。それには望遠鏡が四力所必要だ。KAGRAを含めた世界的なネットワークが重要」と話す。

東京新聞 2016/2/12

- 重力波が検出された！
- 重力波が検出できた！
- ブラックホールが存在した！
- 連星ブラックホールが存在した！
- 相対性理論, 正しかった！

毎日新聞 2016/2/13

「予想通りで驚いた」 —重力波初観測の報道に接して



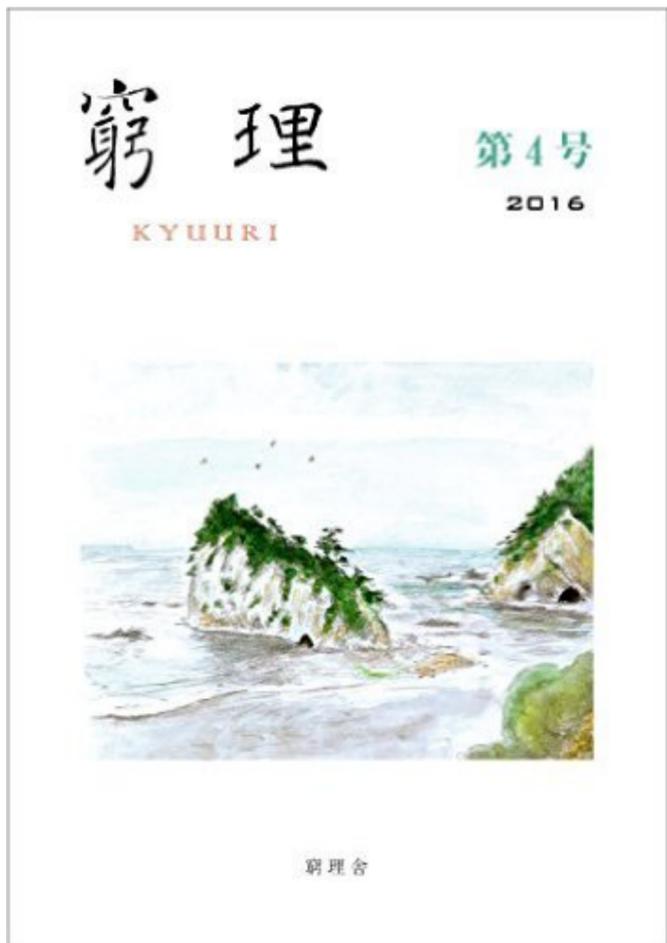
真貝寿明

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、二月一二日深夜（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だ。記者発表の中継は、インターネットで研究者仲間とチャットしながら自宅で見守っていた。発表の第一声は、LIGO所長のデビット・ライツイによる「我々は重力波を検出した。やり遂げたのだ(We did it)」だった。彼のガッツポーズが、我々の喜びを倍増させた。

重力波については広く報道されたので、ここでは詳細を避けるが、少しだけ

自由に語る。



2016年7月20日発売

内容紹介

物理系の科学者が中心の随筆雑誌。

随筆以外にも、評論や歴史譚なども織り交ぜ、科学の視点に立ちながらも、社会や文明

表紙画／戸田盛和

裏表紙画／細谷暁夫

○ 目次構成

私の古典探索—窮理学師江漢／池内了

ガールフレンド／亀淵迪

「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

しんかい・ひさあき。
一九六六年生まれ。早稲田大学大学院理工学研究科修了。博士（理学）。ワシントン大（セントルイス）博士研究員、ペンシルバニア州立大学客員研究員、理化学研究所基礎科学特別研究員などを経て、現在、大阪工業大学情報科学部教授。専門は、一般相対性理論。最近では高次元時空の特異点形成などを研究している。著書に「図解雑学タイムマシンと時空の科学」「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」「日常の「なぜ」に答える物理学」などがある。ホームページは、<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>

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側の側面が強かった。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示したのである。

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)パ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。「もっと科学を」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ふ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す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「もっと科学を」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「もっと科学を」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に、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、^(注5)チェルノブイリ事故や^(注6)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)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

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から振りまかれ、他方、チェ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 コリンス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、方法的決着ではなく、さまざまなヨウ（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……」。コリンス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 コリンスとピンチは、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 | (エ) センコク | 4 |
| ① | ゴリヤクがある | ① | 上級裁判所へのジヨウコク |
| ② | ツウヤクの資格を取得する | ② | コクメイな描写 |
| ③ | ヤクドシを乗り切る | ③ | コクビヤクのつけにくい議論 |
| ④ | ヤツキになって反対する | ④ | コクソウ地帯 |
| ⑤ | ヤッコウがある野草を探す | ⑤ | 筆跡がコクジした署名 |

sport

2016/4/21

Cameron McEvoy wears his passion on his swimming cap

Swimmer and physics student Cameron McEvoy is sporting the signature of a gravitational wave on his cap.



Cameron McEvoy wins a 100m heat with the gravitational wave on his Bond University club cap. *Source:AAP*

The discovery has made a big impression on McEvoy, 21, whose heroes tend to be scientists rather than swimmers.

“It’s the 100th anniversary of Einstein’s general theory of relativity, which is his theory of gravity and coincidentally, physicists at Advanced LIGO (observatory) discovered gravitational waves, which is the stretching and contraction of space-time itself — everything we move in and pretty much what the universe is,” he said.



2017/10





GRAVITATIONAL WAVES DRESS

★★★★★ 6 reviews

\$179.00

SIZE

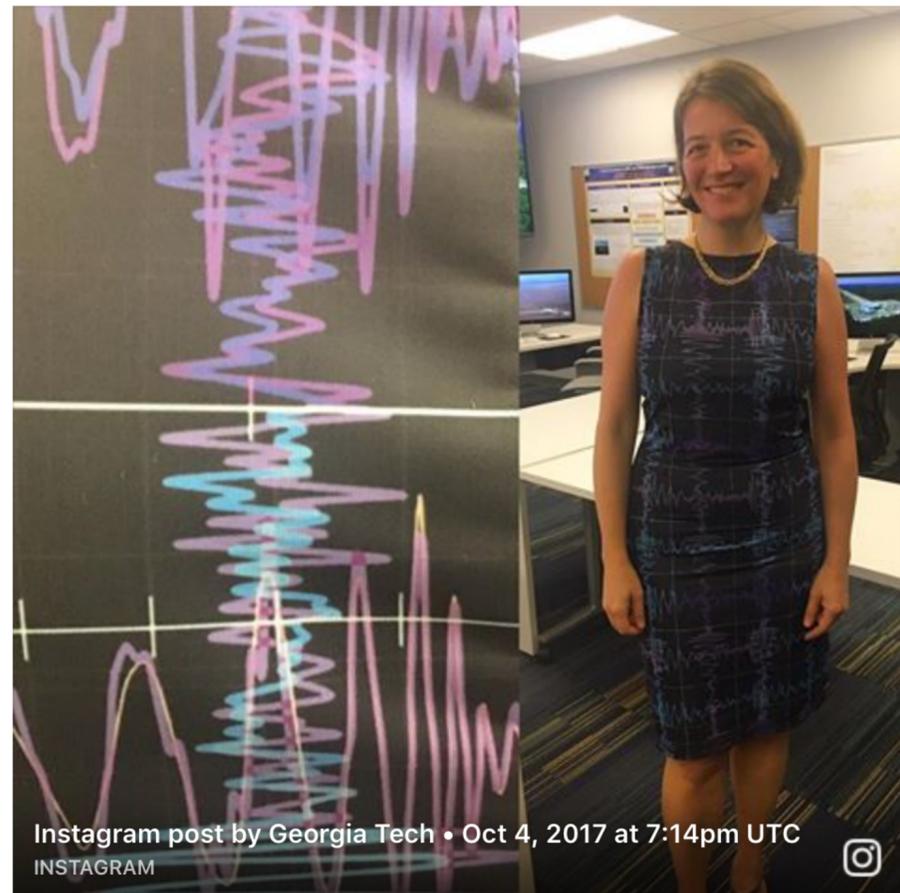
- X-SMALL
- SMALL
- MEDIUM
- LARGE
- X-LARGE



Laura Cadonati

10月11日 1:22

Posting for a bit of comic relief: "It's like a better version of Ms Frizzle!!" Thanks to Gabriela Gonzalez for the dress, a rite of passage of sort?



Instagram post by Georgia Tech • Oct 4, 2017 at 7:14pm UTC

いいね! コメントする シェアする

Accessories > Ties

Gravitational Waves Tie

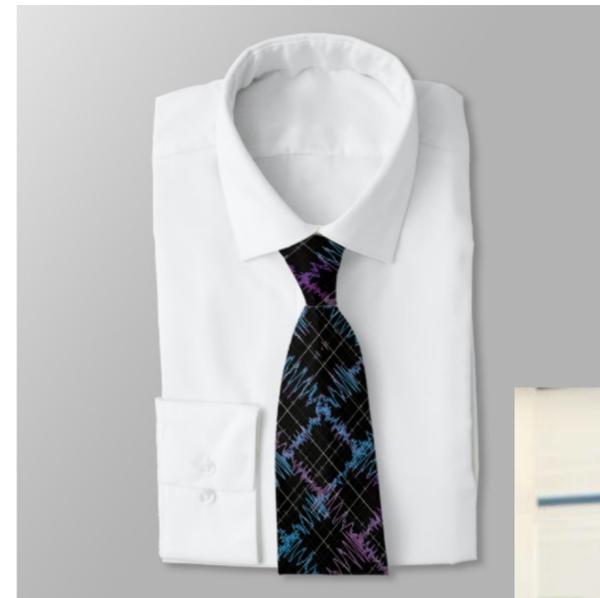
★★★★☆ 4.4 (1254)

\$44.30 per tie

Qty: 1

Add to Cart

15% Off with code CREATIVEDEAL

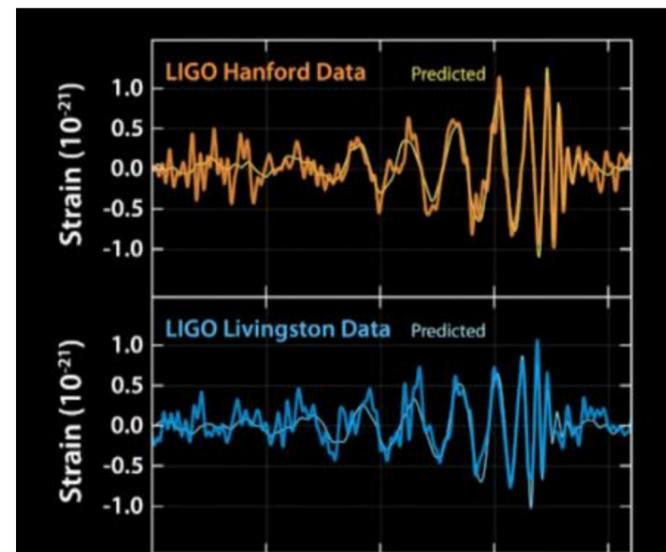


Independent artist's content may not match model depicted; RealView™ technology illustrates fit



Designed for you by Shenova by Zazzle

Customize



重力波の初観測に成功したアメリカの重力波検出グループLIGO（ライゴ, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)の3名へ。

贈賞理由は, "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves" (LIGO検出器開発への貢献と重力波の観測)。

The screenshot shows the Nobel Prize website interface. At the top, it says "Nobelprize.org The Official Web Site of the Nobel Prize". Below that is a navigation menu with links for Home, Nobel Prizes and Laureates, Nomination, Ceremonies, Alfred Nobel, Educational, and Events. The main content area features a blue background with the text "2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS" and the names "Rainer Weiss", "Barry C. Barish", and "Kip S. Thorne". To the right of the text are two gold Nobel medals. The quote "For the greatest benefit to mankind" by Alfred Nobel is also visible.

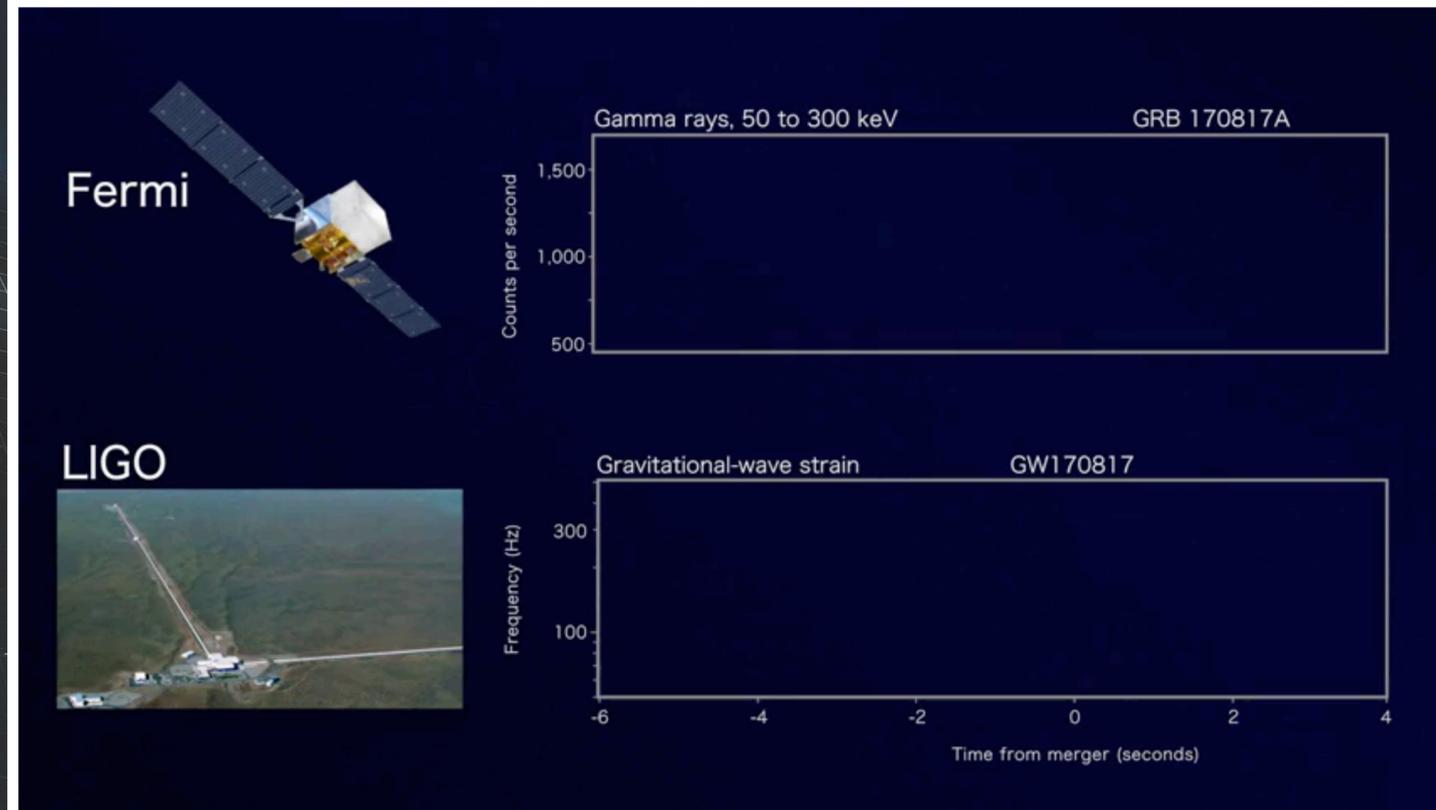
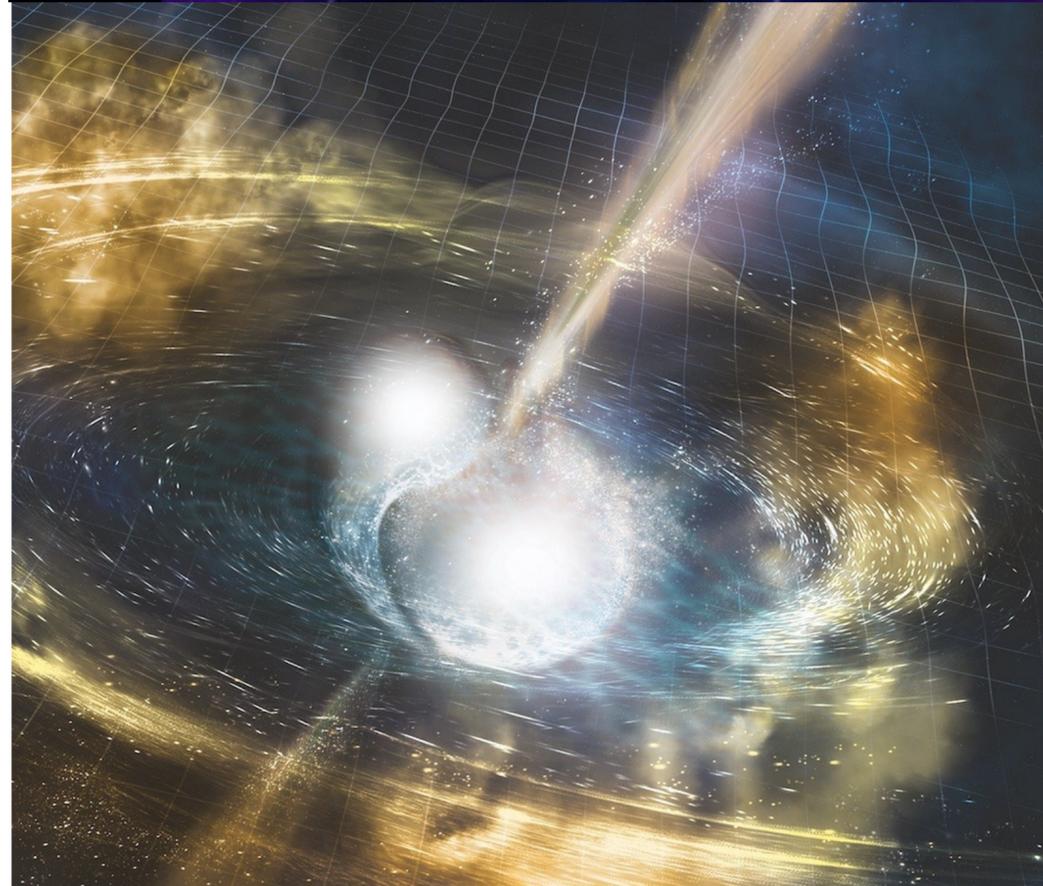
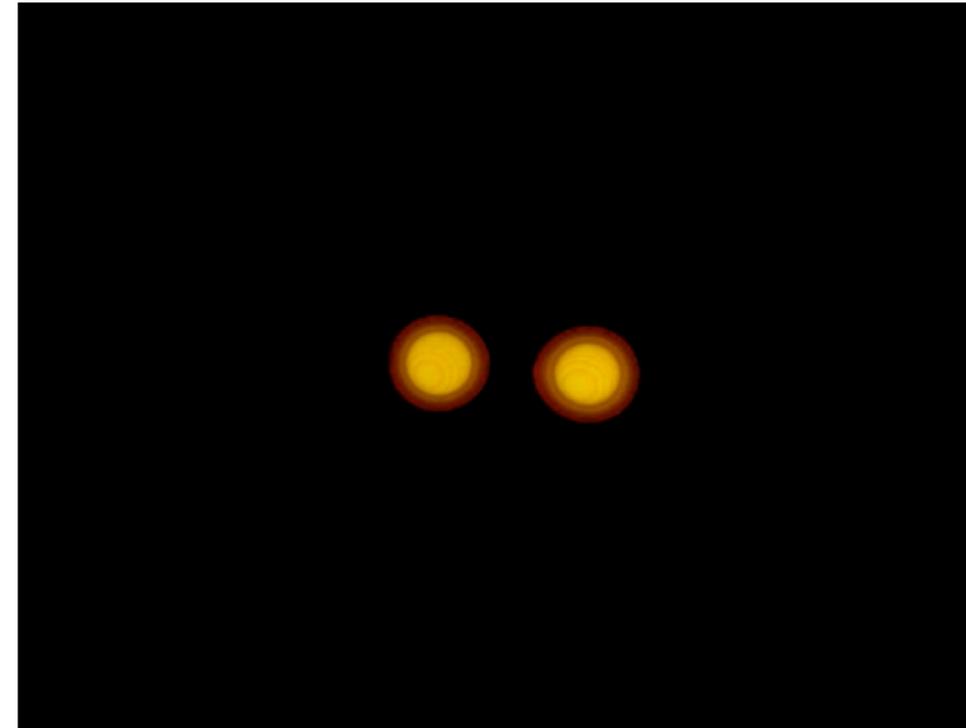
This is the official announcement graphic for the 2017 Nobel Prize in Physics. It features three stylized portraits of the laureates: Rainer Weiss, Barry C. Barish, and Kip S. Thorne. The text reads "The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the 2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS" and lists the laureates' names. Below the names is the citation: "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves". The Nobel Prize logo and the motto "For the greatest benefit to mankind" by Alfred Nobel are also present.

ライナー・ワイス(85)

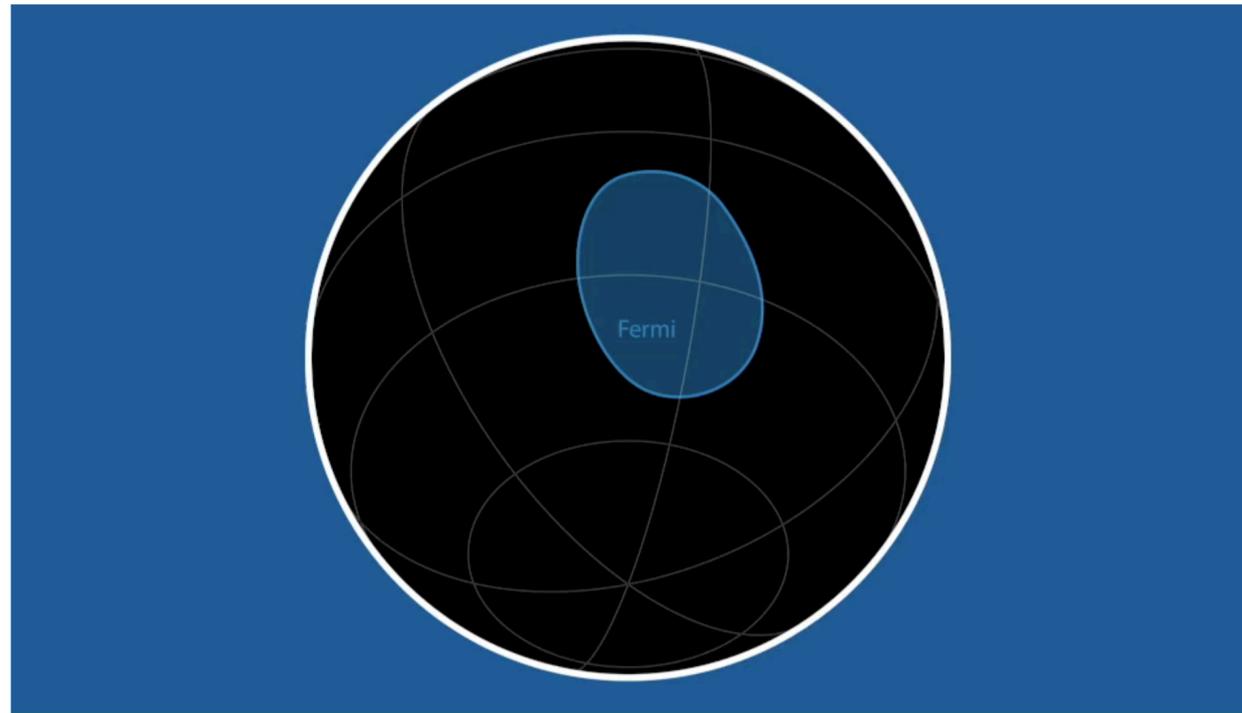
バリー・バリッシュ(77)

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先) !

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

Abbott et al.

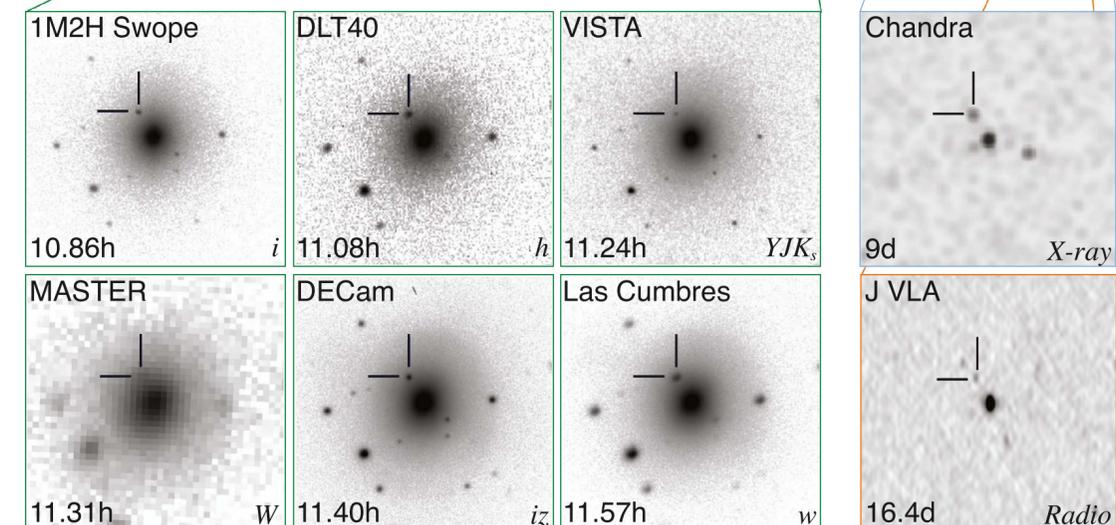
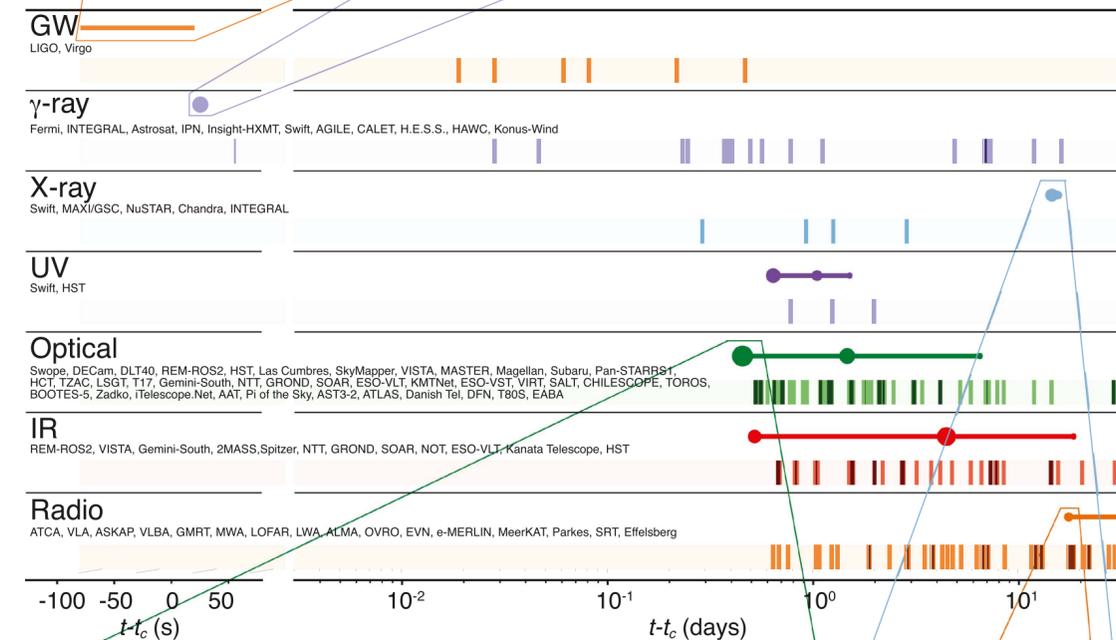
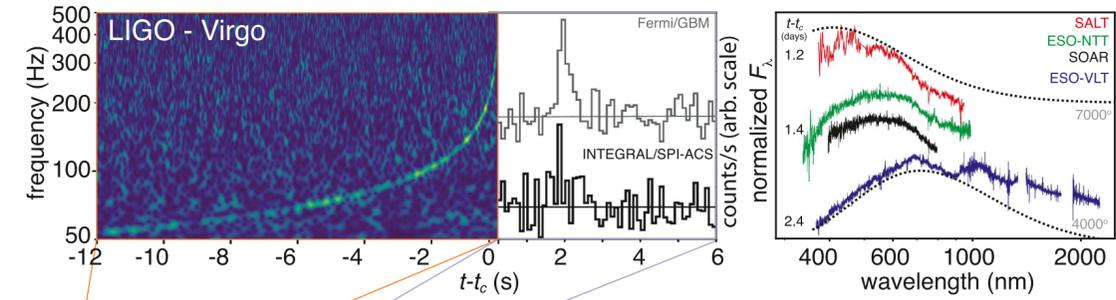


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations, are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent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

**FIRST COSMIC EVENT OBSERVED
IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT**
Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

LIGO Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics

周期表 (periodic table)

Period	1	1A																	18	VIII A		
	1	1s	1																	2		
			H																	He		
			水素 hydrogen 1.008																	ヘリウム helium 4.003		
	2	2s	3	4																	10	
			Li	Be																	Ne	
			リチウム lithium 6.941	ベリリウム beryllium 9.012																	ネオン neon 20.18	
	3	3s	11	12																	18	
		Na	Mg																	Ar		
		ナトリウム sodium 22.99	マグネシウム magnesium 24.31																	アルゴン argon 39.95		
4	4s	19	20																	36		
		K	Ca																	Kr		
		カリウム potassium 39.10	カルシウム calcium 40.08																	クリプトン krypton 83.80		
5	5s	37	38																	54		
		Rb	Sr																	Xe		
		ルビジウム rubidium 85.47	ストロンチウム strontium 87.62																	キセノン xenon 131.3		
6	6s	55	56																	86		
		Cs	Ba																	Rn		
		セシウム cesium 132.9	バリウム barium 137.3																	ラドン radon 222		
7	7s	87	88																	118		
		Fr	Ra																	Og		
		フランシウム francium 223	ラジウム radium 226																	オガネソン oganesson 294		

原子番号 →	29	+2,1	← 通常できるイオンの価数
元素記号 →	Cu		← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素
元素名(日本語) →	銅		
元素名(英語) →	copper		
	63.55	← 原子量	

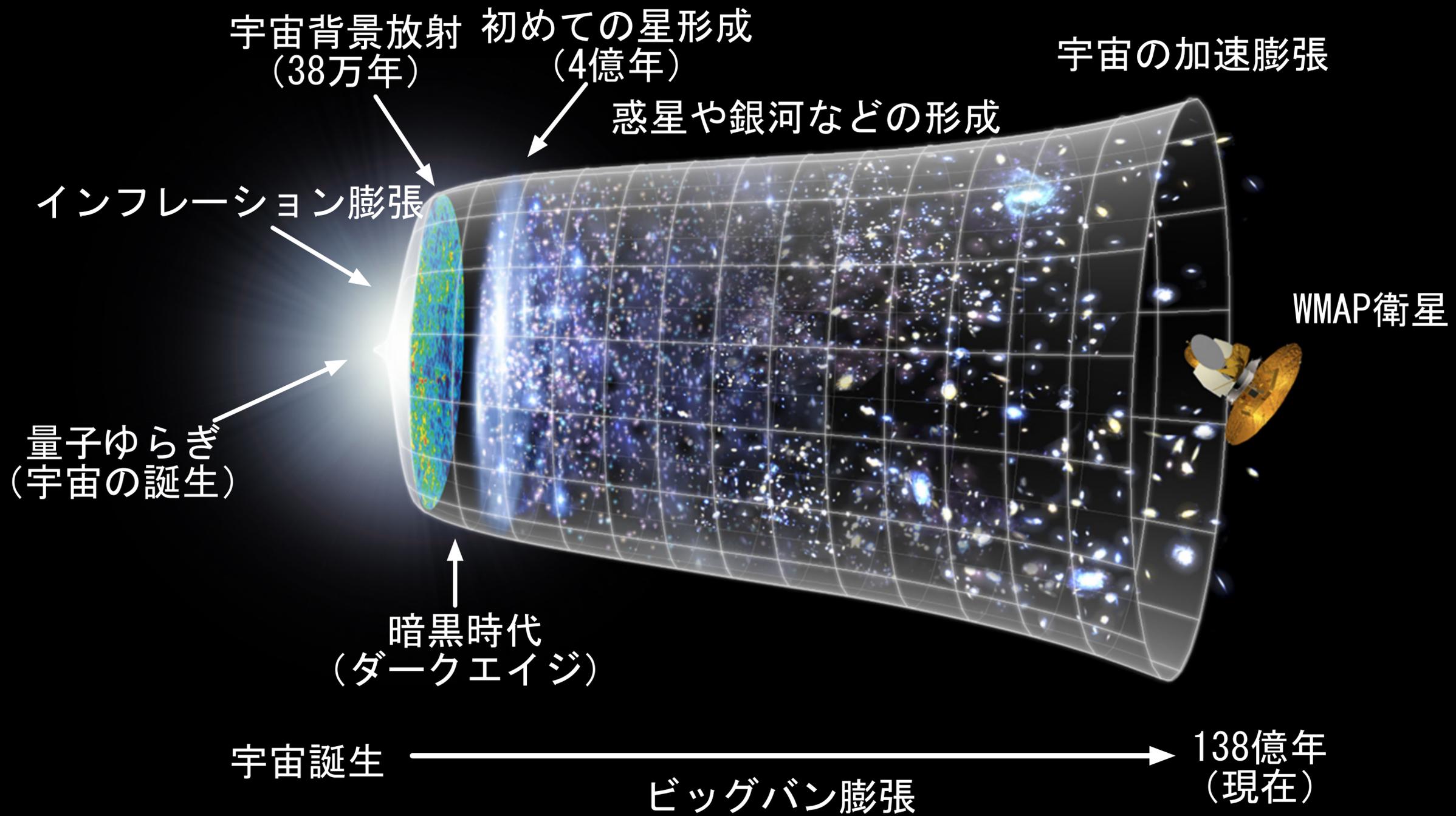
↑ 非金属元素	↓ 金属元素
↑ 非金属元素	↓ 金属元素

常温で気体	単体は半導体	
常温で液体	単体は強磁性体	放射性同位体のみからなる元素

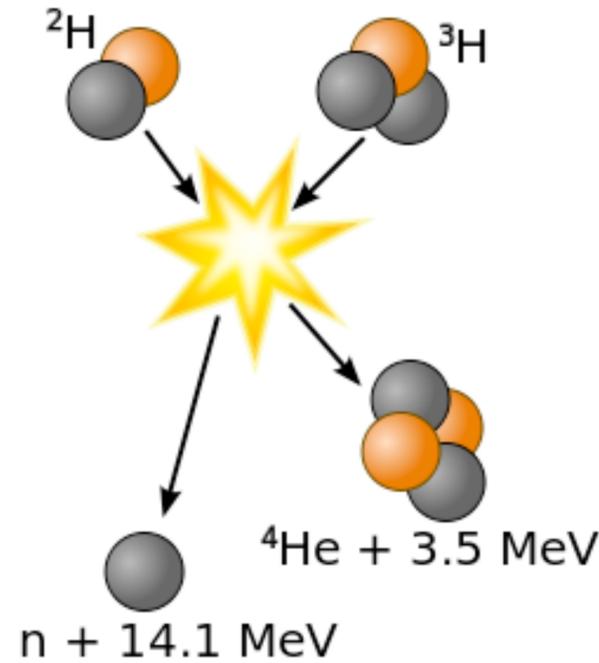
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	I B	II B
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
スカンジウム scandium 44.96	チタン titanium 47.87	バナジウム vanadium 50.94	クロム chromium 52.00	マンガン manganese 54.94	鉄 iron 55.85	コバルト cobalt 58.93	ニッケル nickel 58.69	銅 copper 63.55	亜鉛 zinc 65.41
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
イットリウム yttrium 88.91	ジルコニウム zirconium 91.22	ニオブ niobium 92.91	モリブデン molybdenum 95.94	テクネチウム technetium 98	ルテニウム ruthenium 101.1	ロジウム rhodium 102.9	パラジウム palladium 106.4	銀 silver 107.9	カドミウム cadmium 112.4
57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
ランタノイド lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg
	ハフニウム hafnium 178.5	タンタル tantalum 180.9	タングステン tungsten 183.8	レニウム rhenium 186.2	オスミウム osmium 190.2	イリジウム iridium 192.2	白金 platinum 195.1	金 gold 197.0	水銀 mercury 200.6
89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
アクチノイド actinides	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn
	ラザホージウム rutherfordium 261	ドブニウム dubnium 262	シーボーギウム seaborgium 266	ボヘリウム bohrium 264	ハッシウム hassium 277	マイトネリウム meitnerium 268	ダームスタチウム darmstadtium 281	レントゲニウム roentgenium 272	コペルニシウム copernicium 285

↑ 4f	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	ランタン lanthanum 138.9	セリウム cerium 140.1	プラセオジウム praseodymium 140.9	ネオジウム neodymium 144.2	プロメチウム promethium 145	サマリウム samarium 150.4	ユウロピウム europium 152.0	ガドリニウム gadolinium 157.3	テルビウム terbium 158.9	ジスプロシウム dysprosium 162.5	ホルミウム holmium 164.9	エルビウム erbium 167.3	ツリウム thulium 168.9	イッテルビウム ytterbium 173.0	ルテチウム lutetium 175.0
↑ 5f	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	アクチニウム actinium 227	トリウム thorium 232.0	プロトアクチニウム protactinium 231.0	ウラン uranium 238.0	ネプツニウム neptunium 237	プルトニウム plutonium 239	アメリシウム americium 243	キュリウム curium 247	バークリウム berkelium 247	カリホルニウム californium 251	アインシュタインウム einsteinium 252	フェルミウム fermium 257	メンデレヴィウム mendelevium 258	ノーベリウム nobelium 259	ローレンシウム lawrencium 262

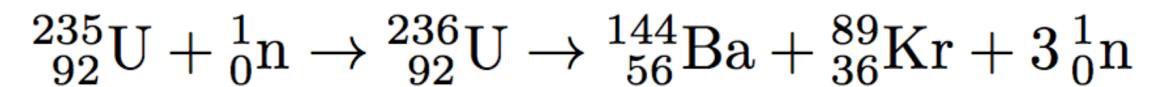
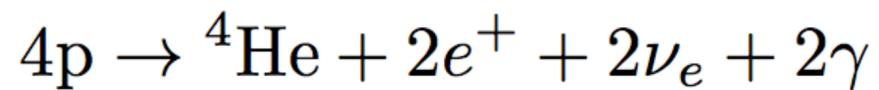
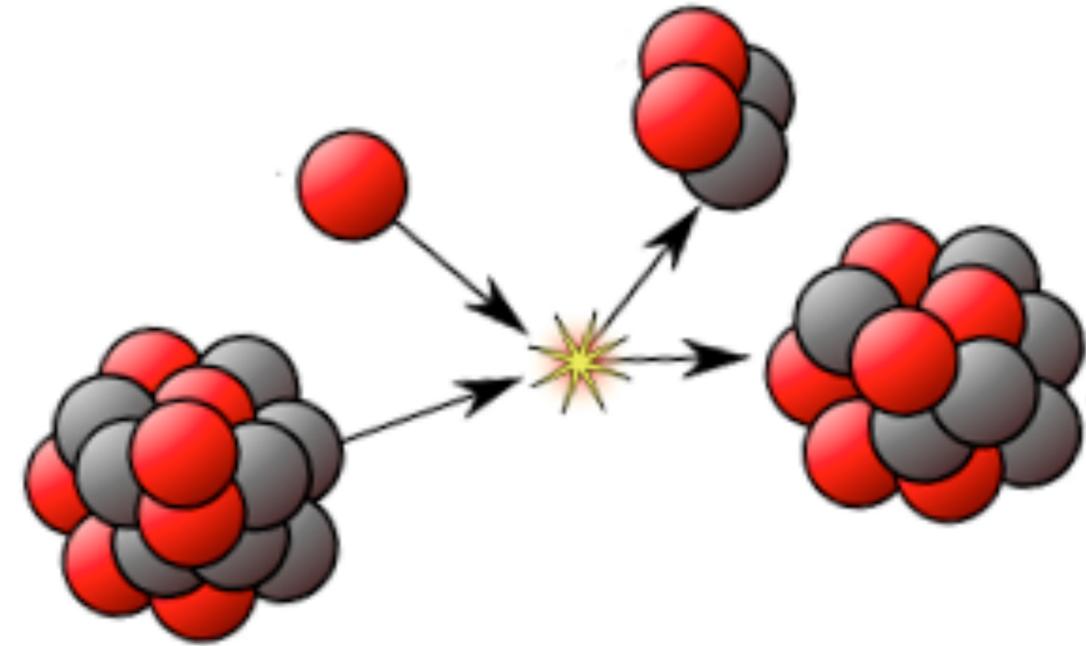
93番以降は、すべて人工合成されたもの



核反応 原子核の組み替えによって莫大なエネルギーが放出



$$E = mc^2$$



核融合

(nuclear fusion)

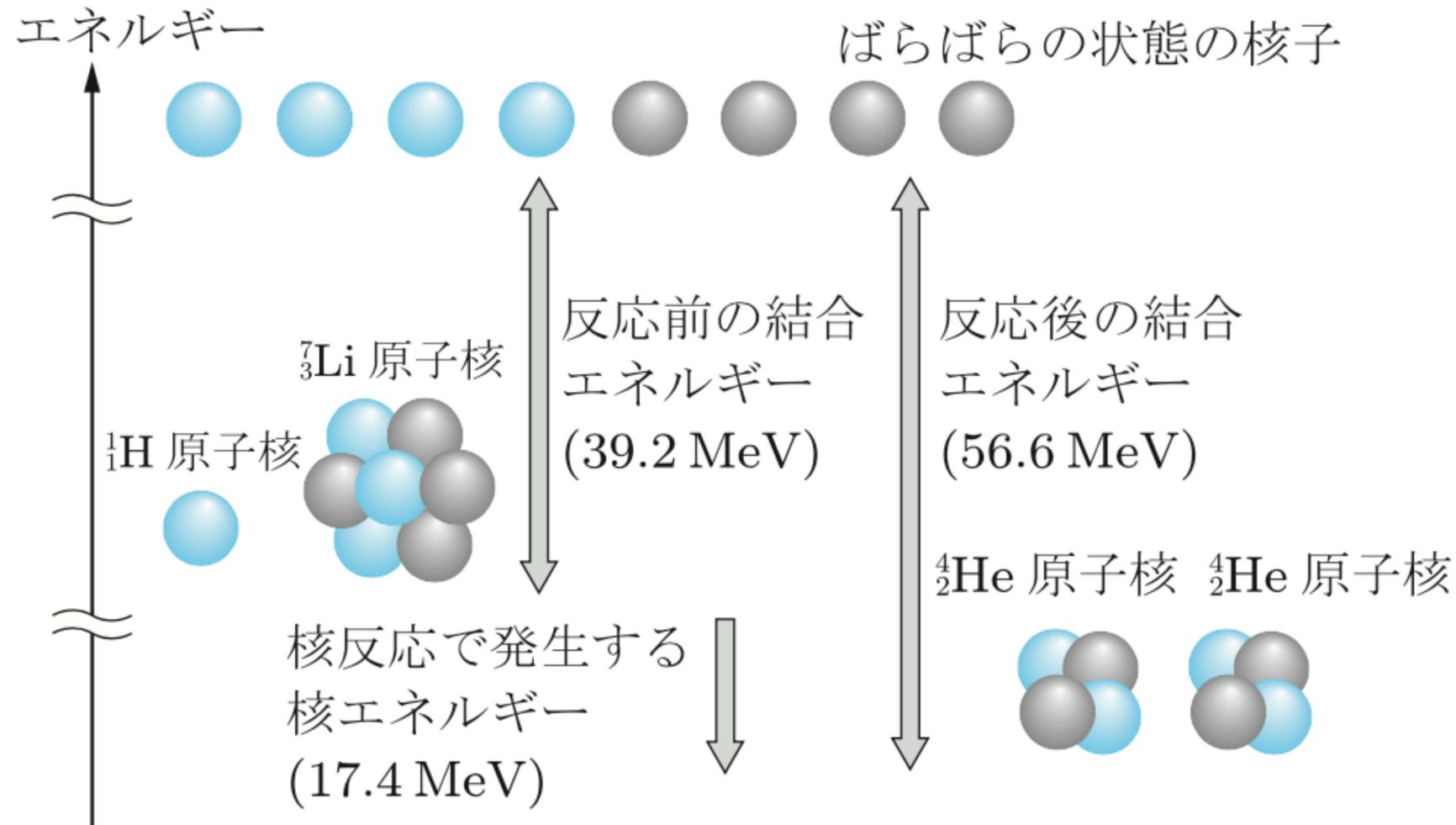
合体した方が安定
(エネルギー放出)

核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

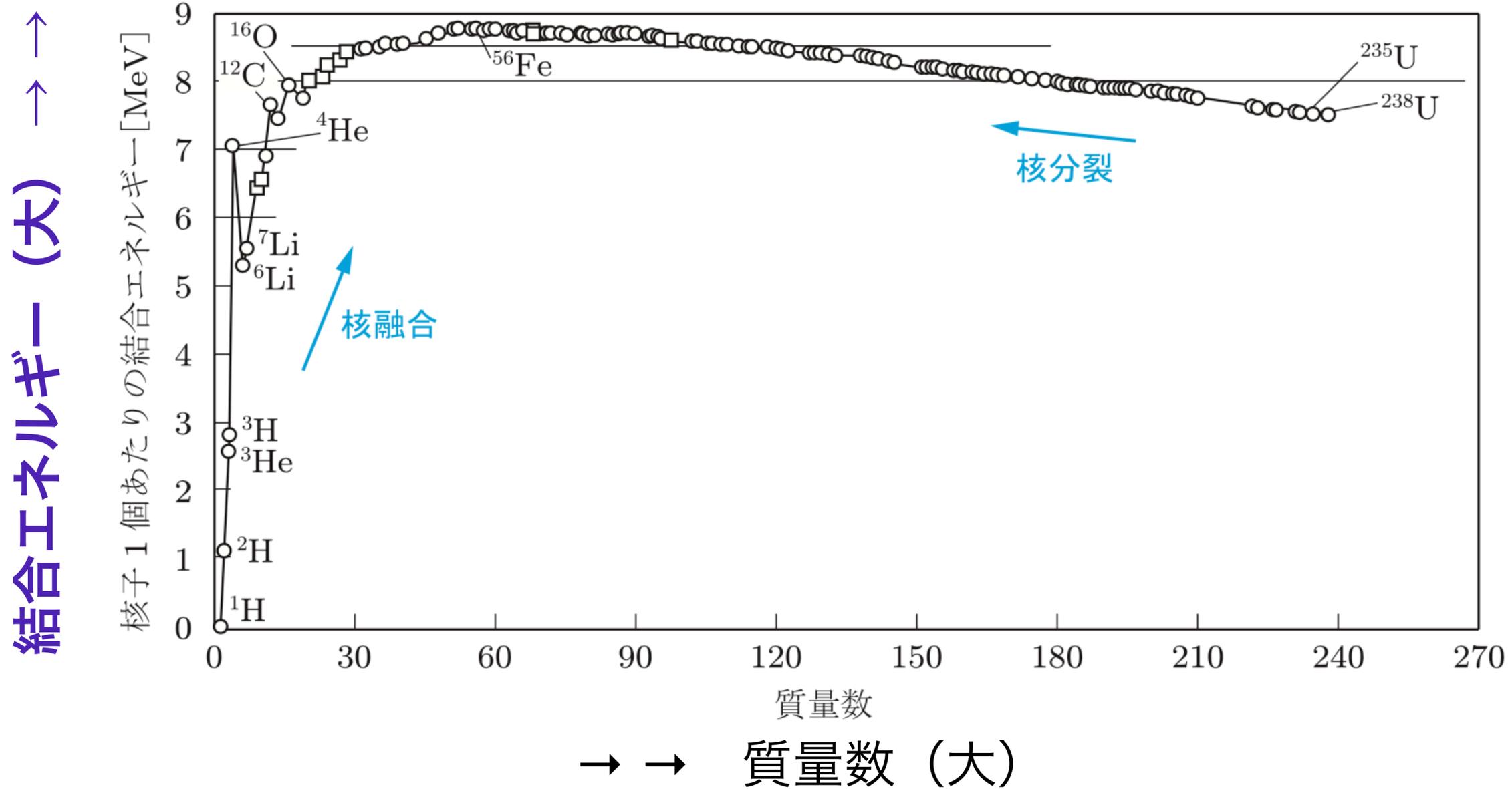
結合エネルギー



$$E = mc^2$$

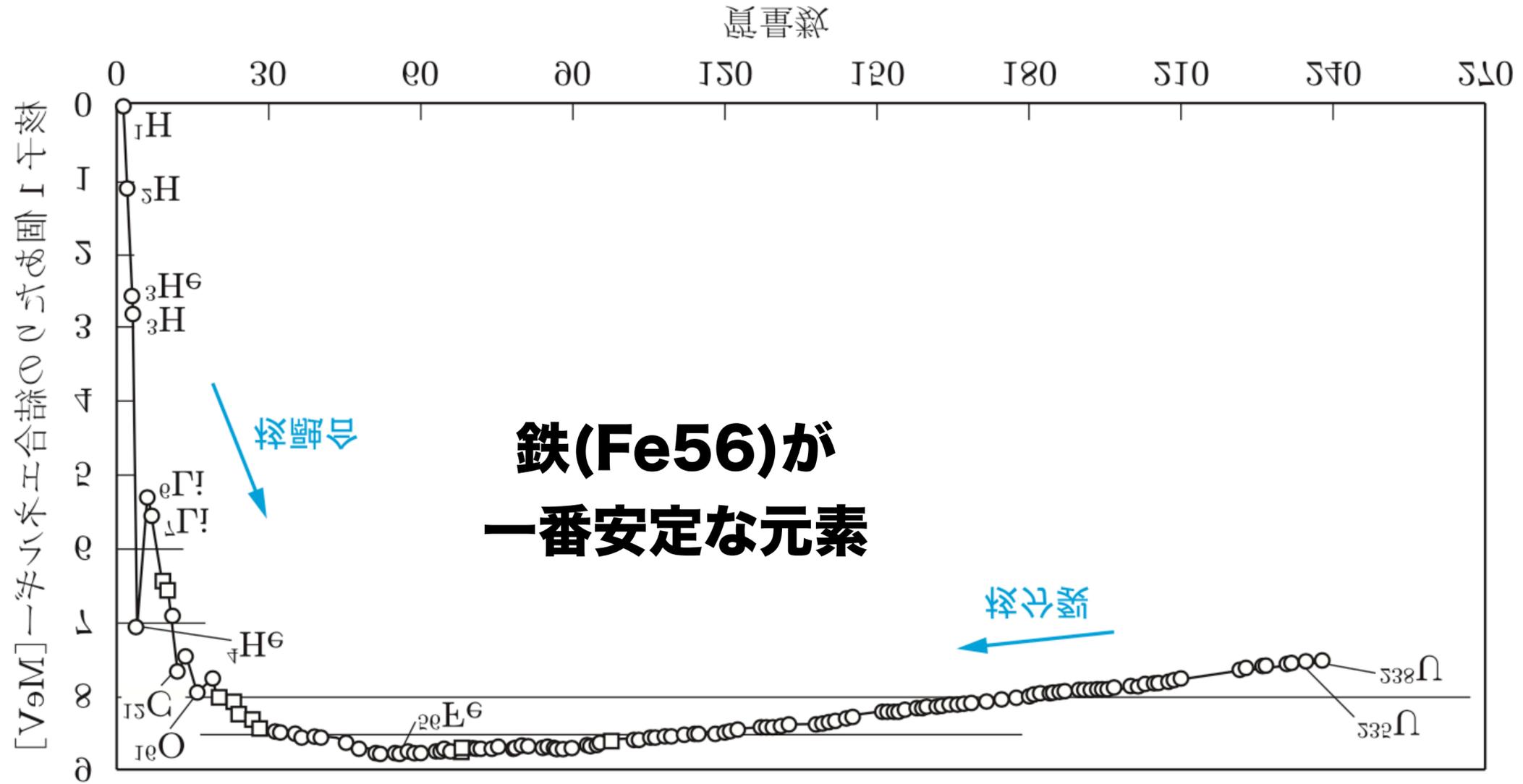
ばらばらでいるより、結合している方が、エネルギーが低い

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

結合エネルギー (大)



→ → 質量数 (大)

The Convection Zone

Energy continues to move toward the surface through convection currents of heated and cooled gas in the convection zone.

The Corona

The ionized elements within the corona glow in the x-ray and extreme ultraviolet wavelengths. NASA instruments can image the Sun's corona at these higher energies since the photosphere is quite dim in these wavelengths.

The Radiative Zone

Energy moves slowly outward—taking more than 170,000 years to radiate through the layer of the Sun known as the radiative zone.

Sun's Core

Energy is generated by thermonuclear reactions creating extreme temperatures deep within the Sun's core.

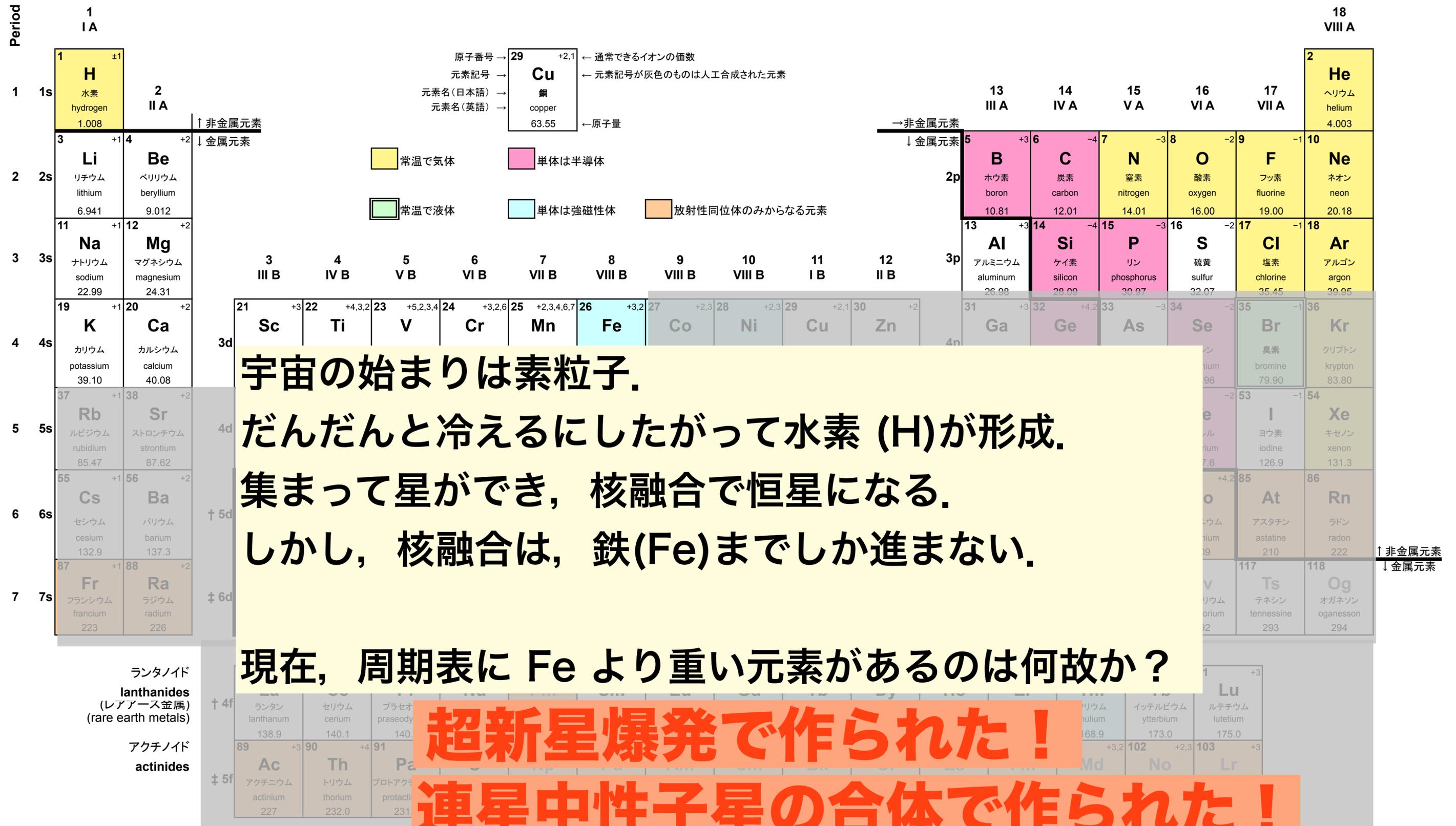
Coronal Streamers

The outward-flowing plasma of the corona is shaped by magnetic field lines into tapered forms called coronal streamers, which extend millions of miles into space.

The Chromosphere

The relatively thin layer of the Sun called the chromosphere is sculpted by magnetic field lines that restrain the electrically charged solar plasma. Occasionally larger plasma features—called prominences—form and extend far into the very tenuous and hot corona, sometimes ejecting material away from the Sun.

周期表 (periodic table)

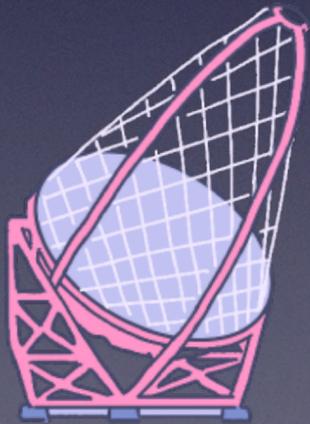


マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

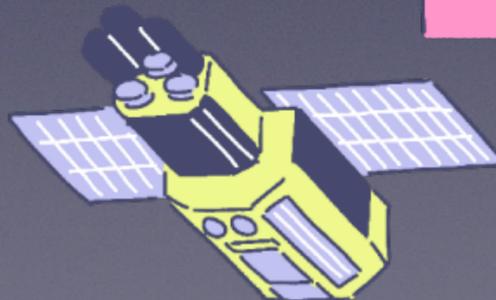


	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波					
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4	
波長[nm]				380	770							
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	テレ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

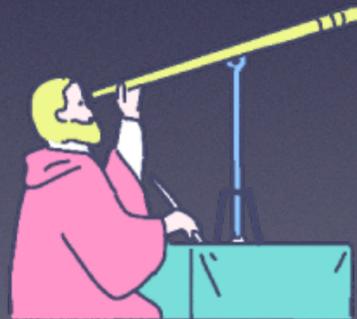
ガンマ線



X線



可視光



赤外



電波



重力波



重力波観測は物理学から天文学へ

1. アインシュタインの相対性理論
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わかったこと, わからないこと
6. 将来計画

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



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

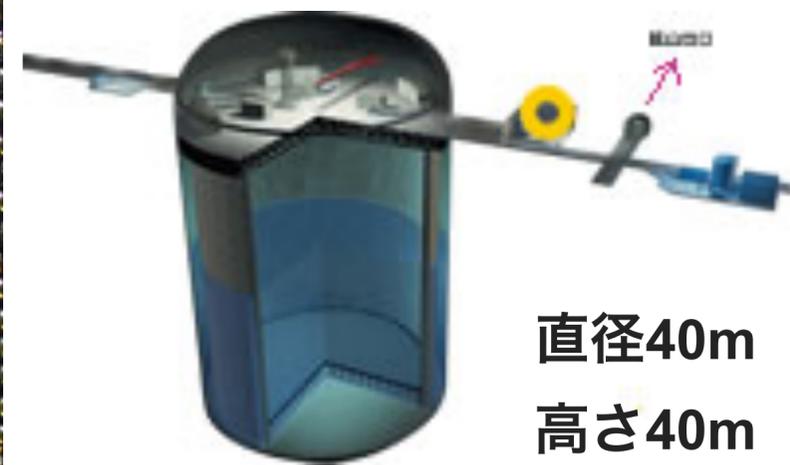
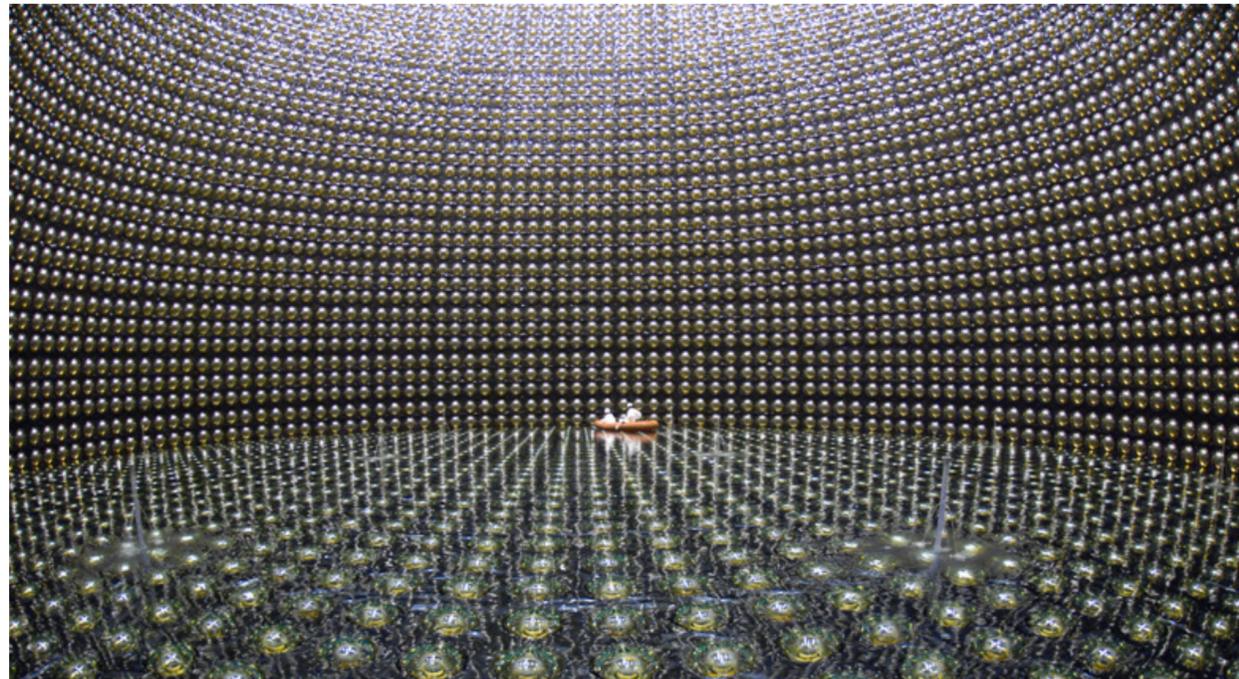
世界の重力波ネットワーク



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

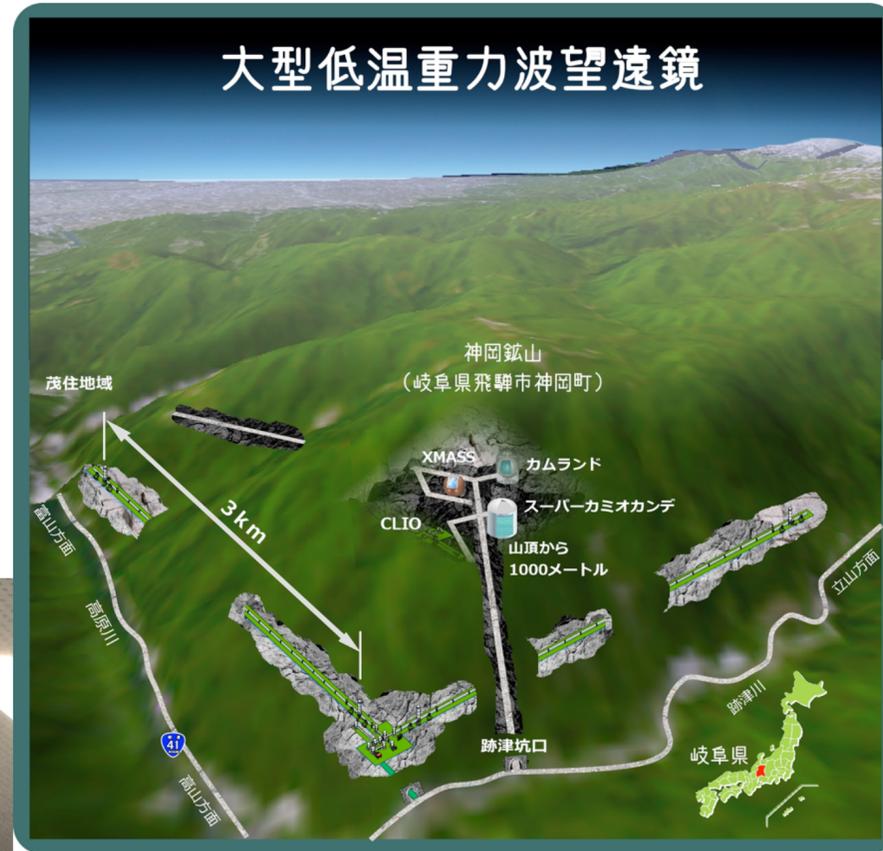
熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア

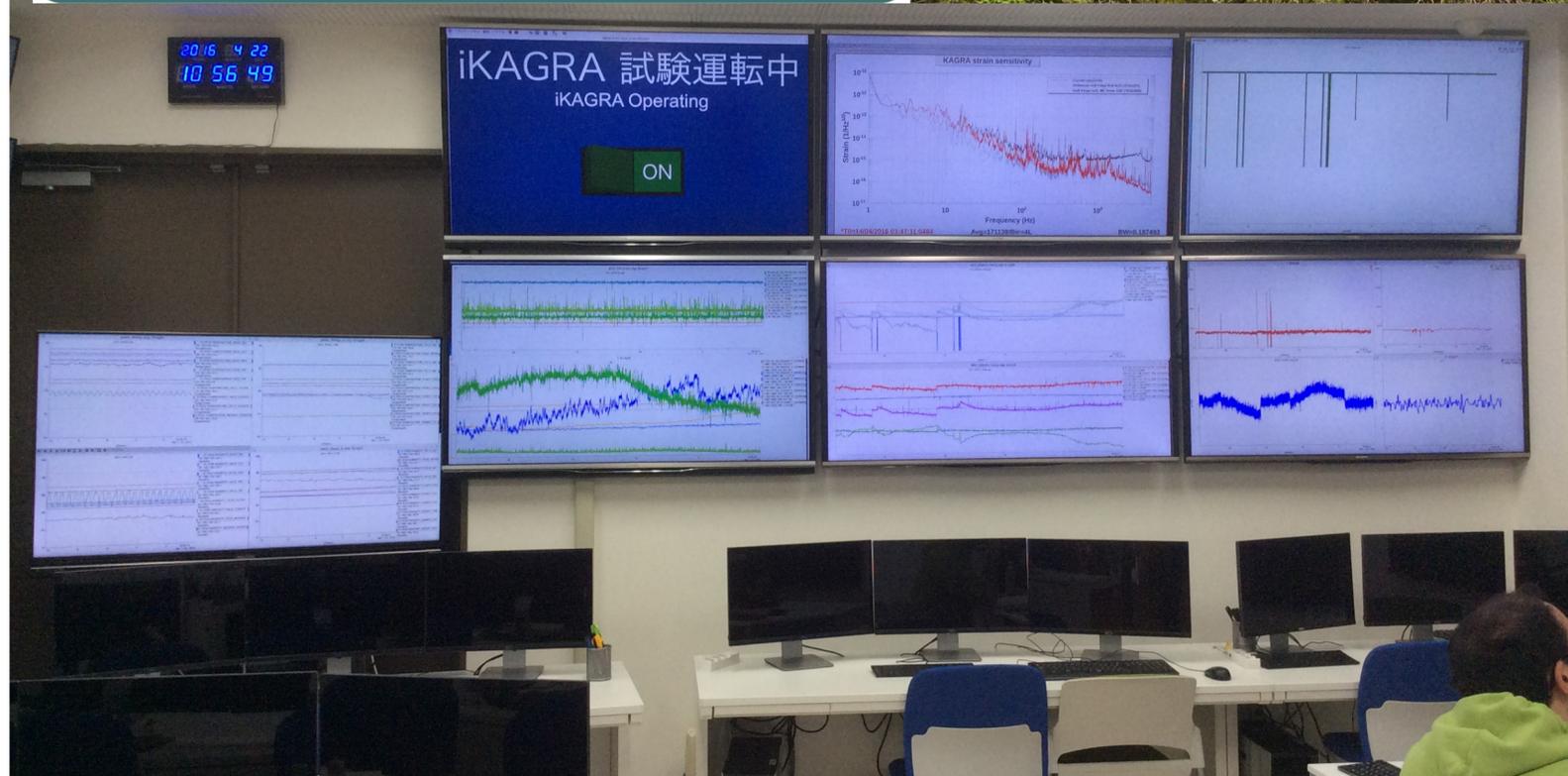
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

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

KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

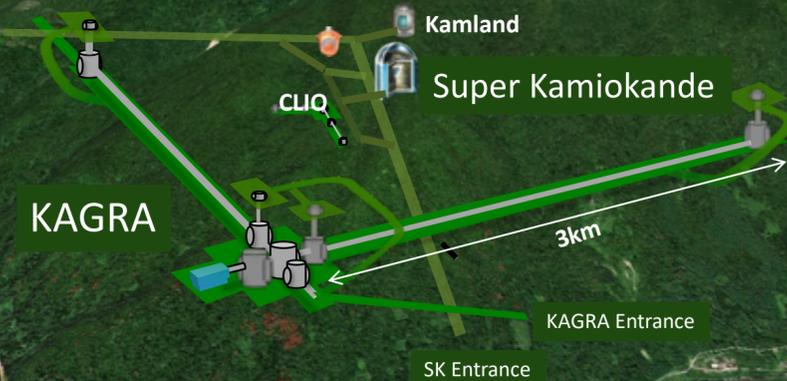
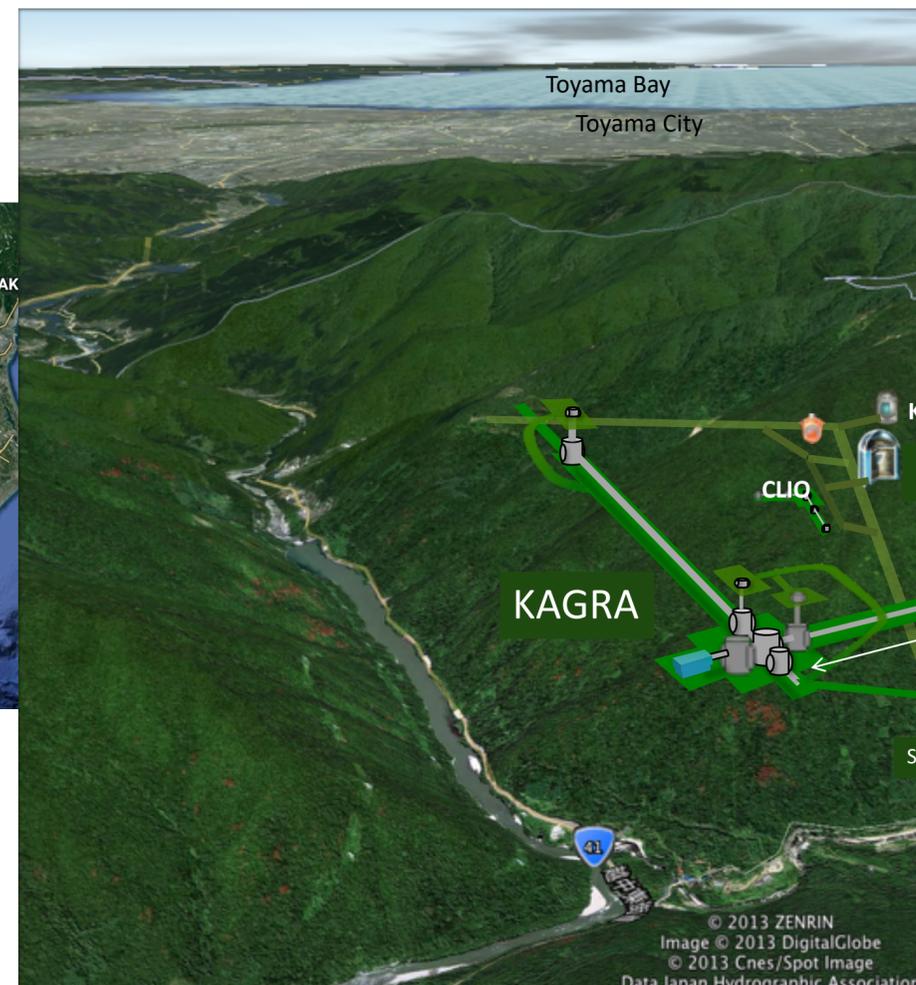
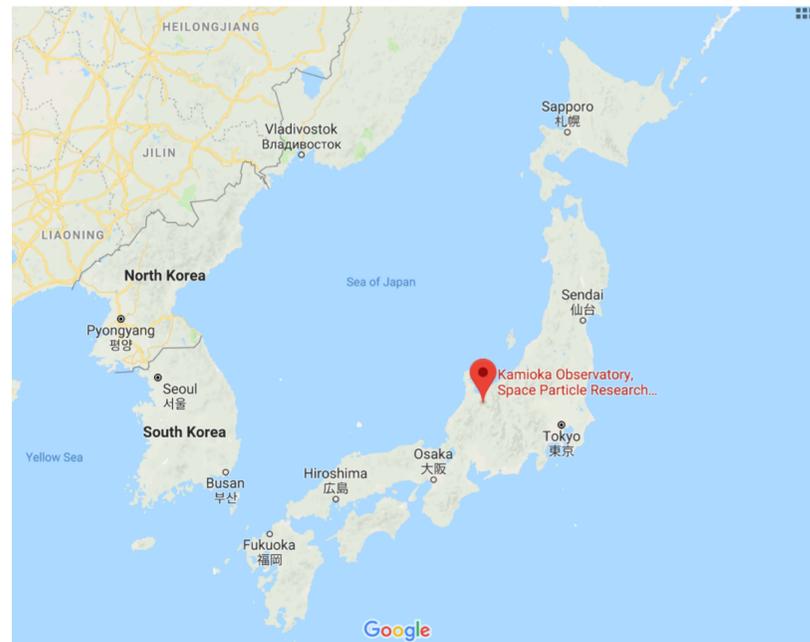


2016年4月



KAGRA (Kamioka GW Observatory)

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



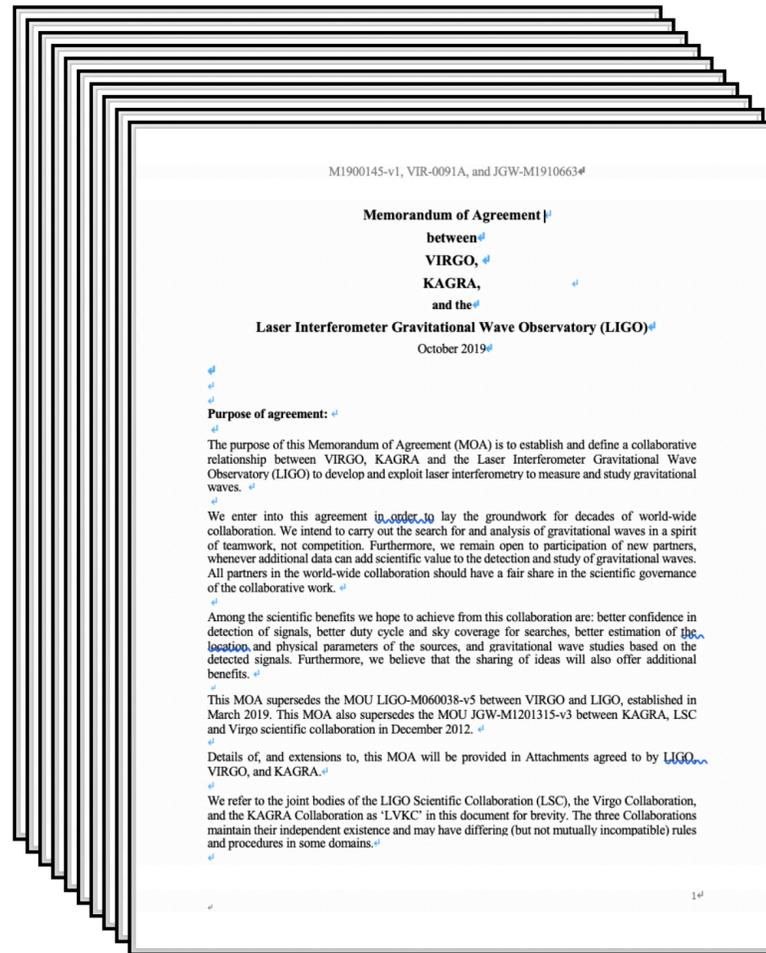
© 2013 ZENRIN
Image © 2013 DigitalGlobe
© 2013 Cnes/Spot Image
Data Japan Hydrographic Association

Google earth

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

重力波望遠鏡 LIGO VIRGO KAGRA 研究協定調印式

2019/10/4

<https://www.youtube.com/watch?v=rw0W24ArmFM>



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

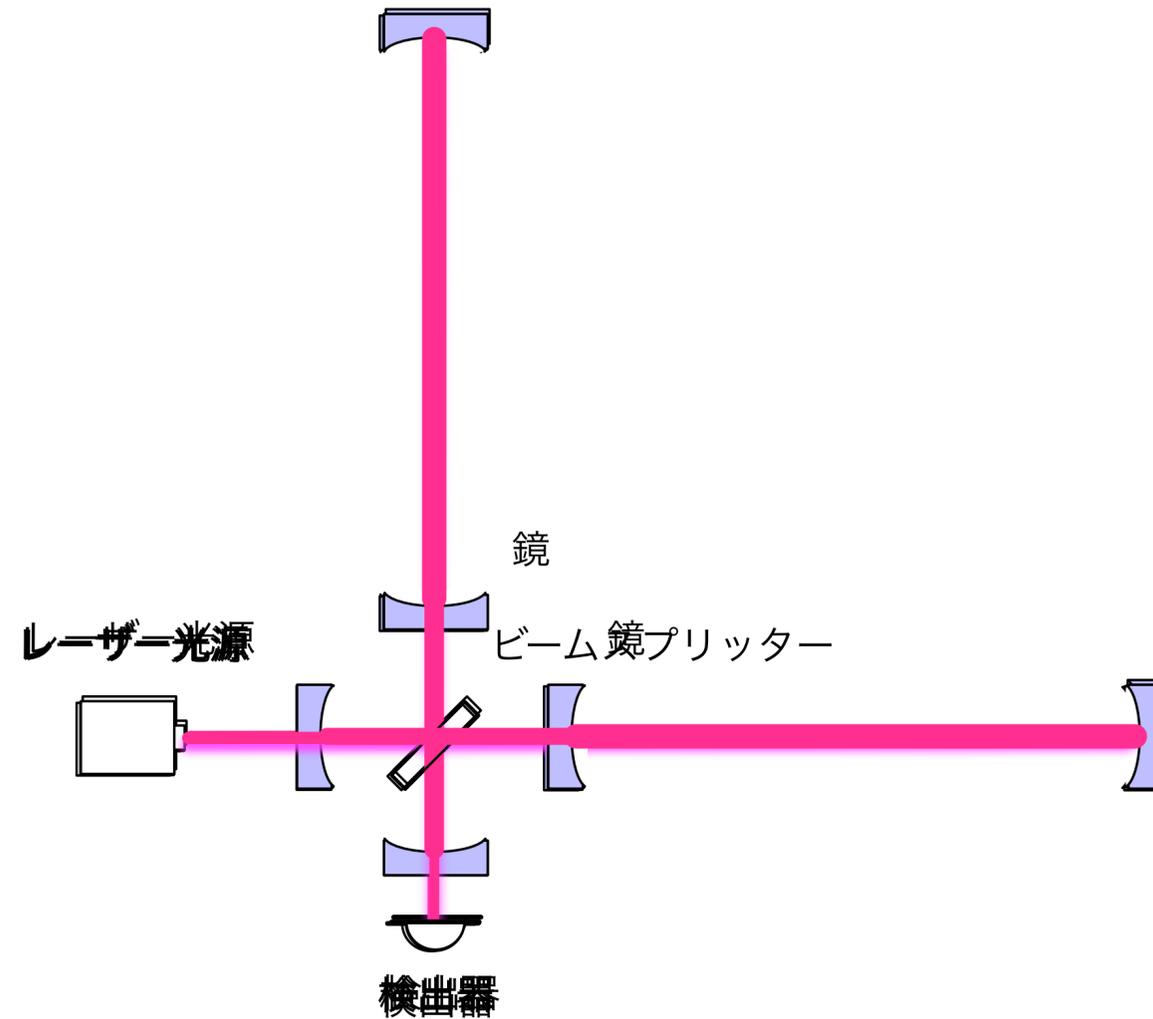
1級

[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) 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

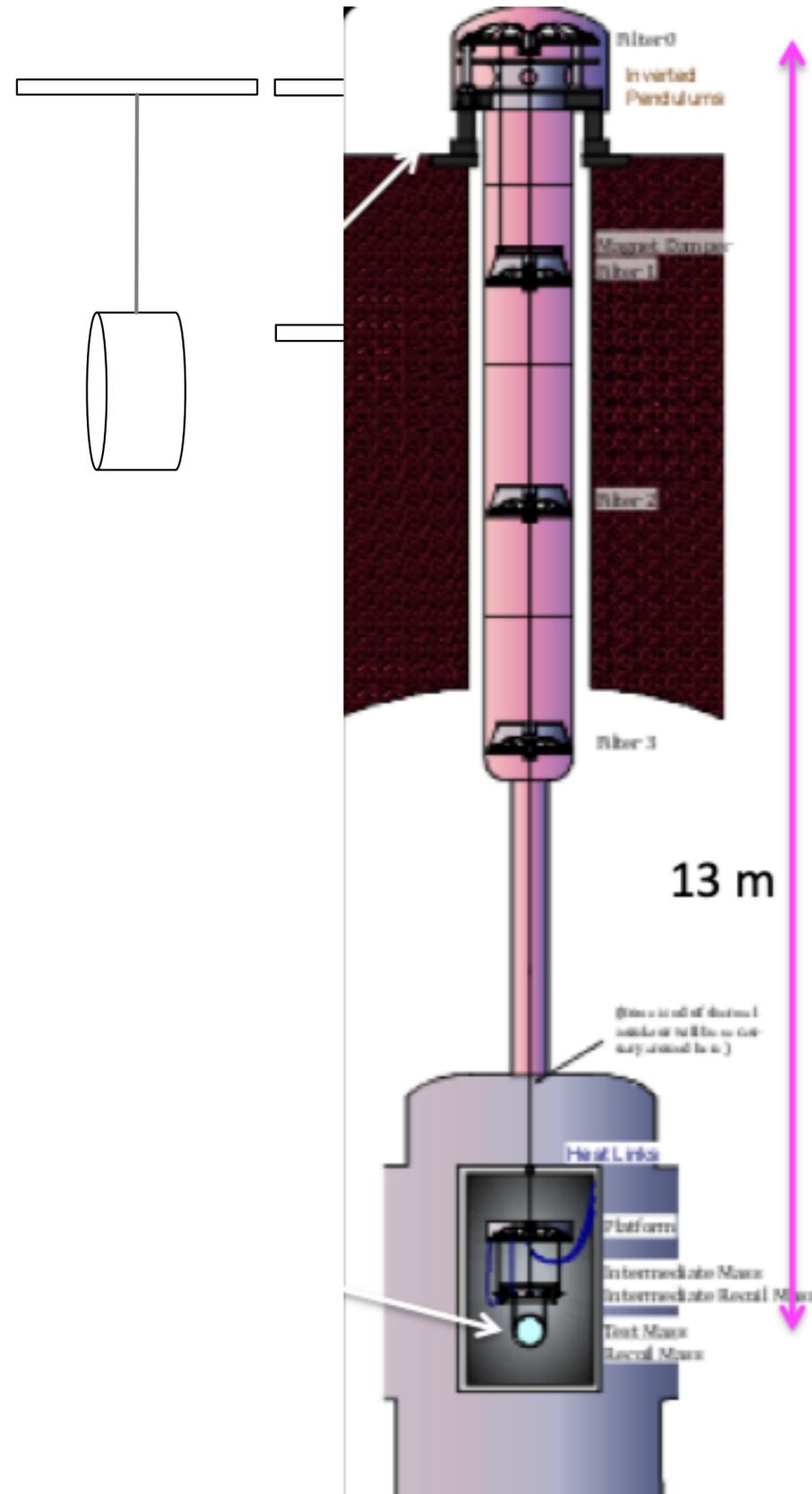
信号がまだ弱い

▶ 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 ○

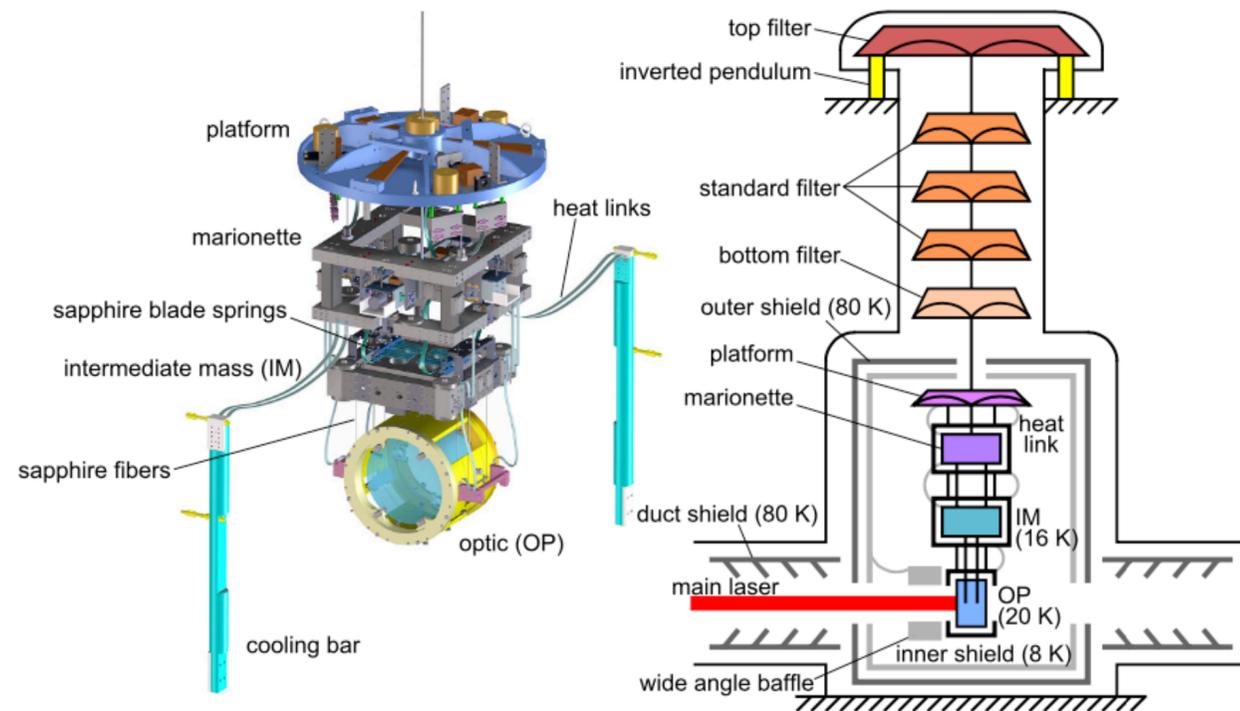
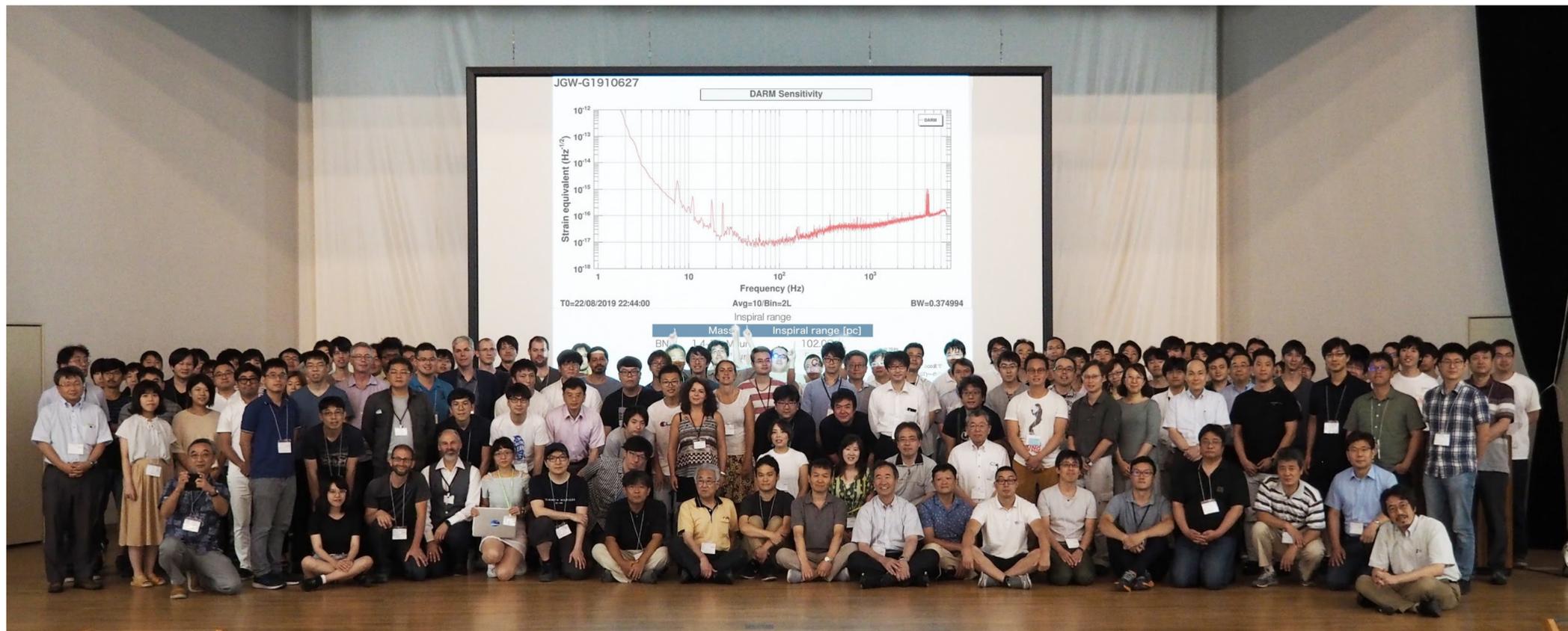


Figure 3. The CAD drawing of the cryogenic payload under Type-A (left) and the schematic of the cryogenic suspension system of sapphire test masses (right). Suspension stages outside of the outer shield are at room temperature.

KAGRAコラボレーション



360 members
200 authors
110 groups
14 regions



国際重力波観測ネットワーク (IGWN)



LIGO LSC
LIGO Scientific Collaboration

Albion Christian University
Albert-Einstein Institut
Andrews University
American University
California Institute of Technology
California State Univ., Fullerton
Canadian Inst. Th. Astrophysics
Carleton College
College of William and Mary
Columbia U. in the City of New York
Embry-Riddle Aeronautical Univ.
Edinb. Lovind University
Georgia Institute of Technology
Goddard Space Flight Center
Hobart & William Smith Colleges
ICTP-SAIFR
INDIGO
IAP-Russian Acad. of Sciences
Inst. Nacional Pesquisas Espaciais
Kenyon College
Korean Gravitational-Wave Group
Louisiana State University
Montana State University
Montclair State University
Moscow State University
National Tsinghua University
Northwestern University

LIGO Laboratory: California Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology, LIGO Hanford Observatory, LIGO Livingston Observatory
Australian National University, Australian Consortium for Interferometric Gravitational Astronomy (ACIGA), Charles Sturt University, Monash University, University of Adelaide, University of Melbourne, University of Western Australia
Germany/British Collaboration for the Detection of Gravitational Waves (GEO600): Cardiff University, Leibniz Universität Hannover, Albert-Einstein Institut, Hannover, King's College London, Rutherford Appleton Laboratory, University of Birmingham, University of Cambridge, University of Glasgow, University of Hamburg, University of Sheffield, University of Southampton, University of Strathclyde, University of the West of Scotland

Virgo Collaboration
Virgo is a European collaboration with about 360 authors from 89 institutes

Advanced Virgo (AdV) and AdV+: upgrades of the Virgo interferometric detector
Participation by scientists from France, Italy, Belgium, The Netherlands, Poland, Hungary, Spain, Germany

- Institutes in Virgo Steering Committee
 - APC Paris
 - ARTEMIS Nice
 - IFAE Barcelona
 - ILM and Navier
 - INFN Firenze-Urbino
 - INFN Genova
 - INFN Napoli
 - INFN Perugia
 - INFN Pisa
 - INFN Roma La Sapienza
 - INFN Roma Tor Vergata
 - INFN Trento-Padova
 - LAL Orsay ESPCI Paris
 - LAPP Anney
 - LKB Paris
 - LMA Lyon
 - Maastricht University
 - Nikhef Amsterdam
 - POLGRAW(Poland)
 - University Nijmegen
 - RMKI Budapest
 - UCLouvain, ULiège
 - Univ. of Barcelona
 - University of Sannio
 - Univ. of Valencia
 - University of Jena

Advanced Virgo project has been formally completed on July 31, 2017
Part of the international network of 2nd generation detectors
Started O3 run on April 1, 2019

8 European countries

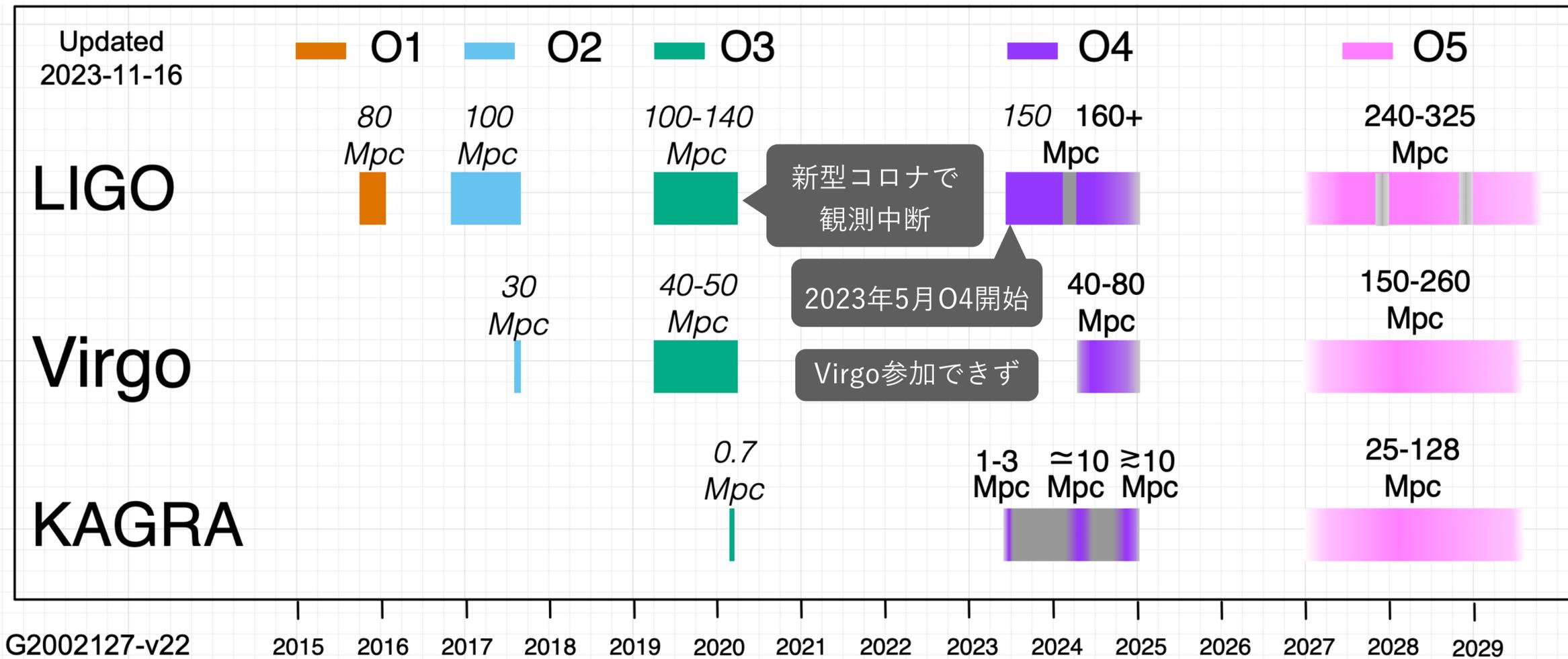


1330 members
860 authors
101 groups
20 countries

465 members
360 authors
96 groups
8 countries

360 members
200 authors
110 groups
14 regions

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4a)



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



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

重力波観測は物理学から天文学へ

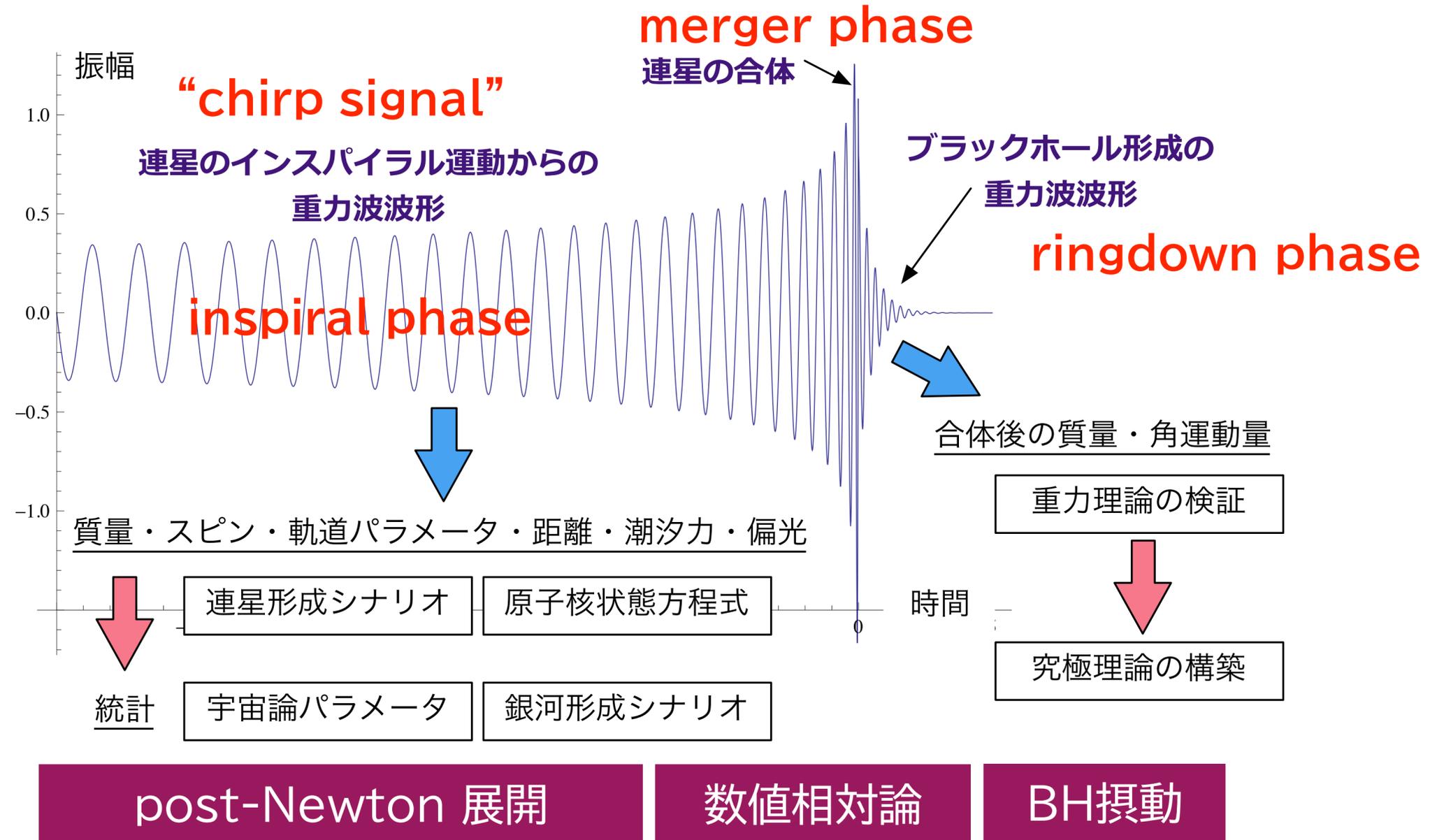
1. アインシュタインの相対性理論
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わかったこと, わからないこと
6. 将来計画

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



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

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

$$(m_1, m_2, \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \iota, \mathbf{n}, t_c, \varphi_c, \psi, r)$$

質量, スピン, 軌道傾斜角, 合体時刻, 位相, 偏角, 距離

重力波で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

→ 原子核の状態方程式

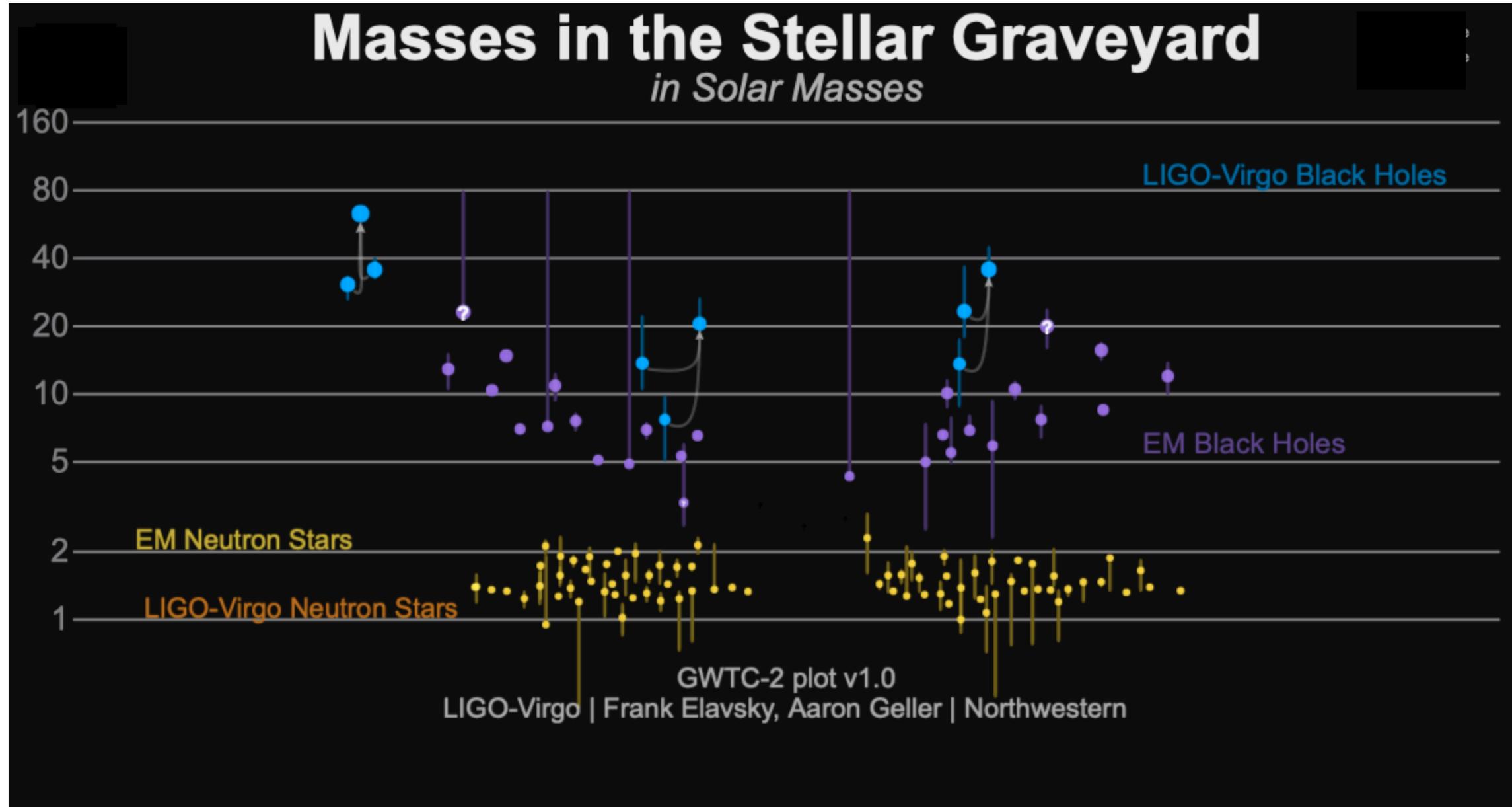
イベント頻度・統計

→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル

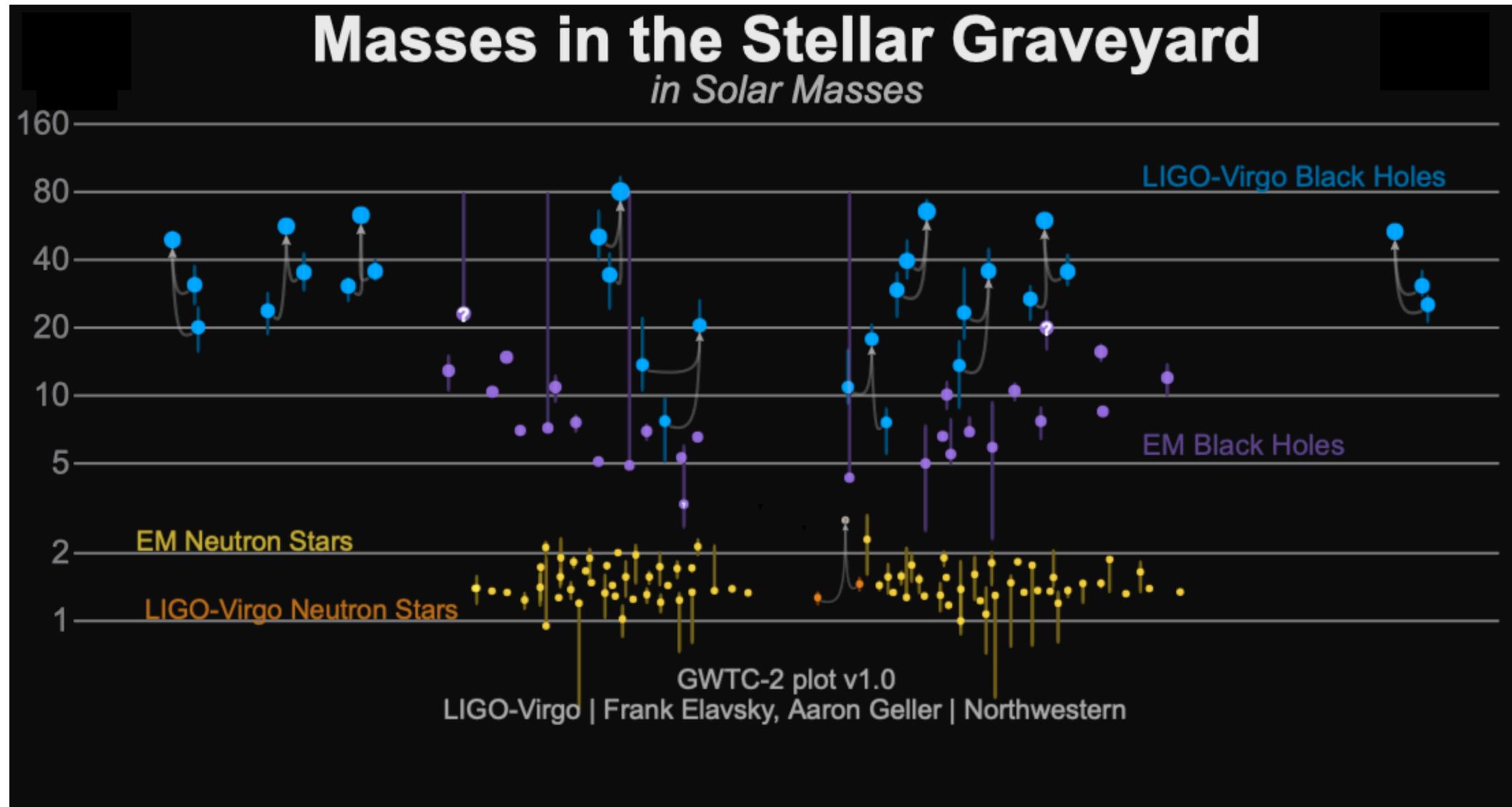
O1 (2015/9/12 - 2016/1/19)



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>

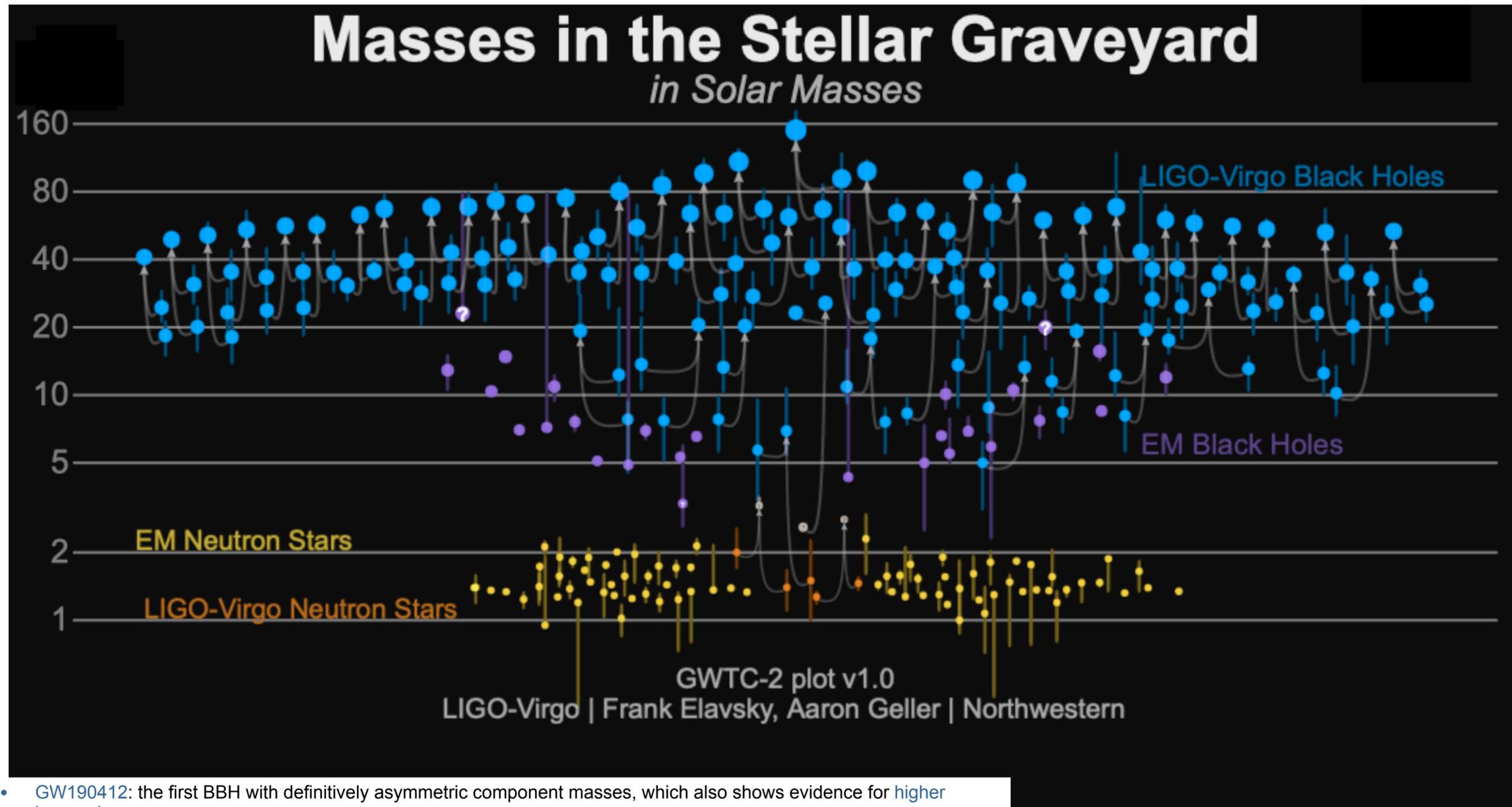


- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic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

10 BHBH

1 NSNS

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



- [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

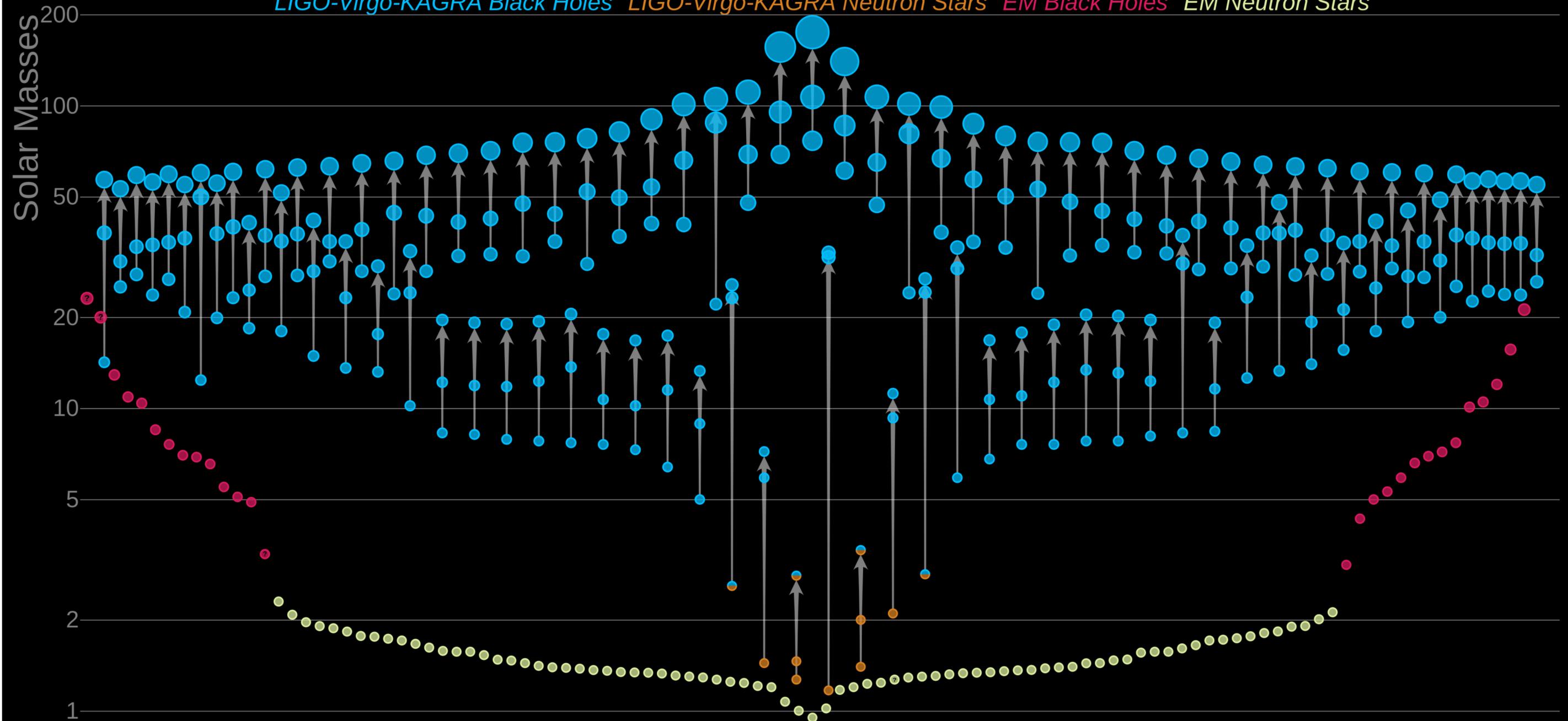
46 BHBH

2 NSNS

2 BH+?

Masses in the Stellar Graveyard

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



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

2021年11月 重力波カタログ3 発表

<https://www.ligo.org/science/Publication-03bCatalog/index.php>



LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2021年11月7日)
<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

GWTC-3, 重力波イベントのカタログ第3版

はじめに

GWTC-3 (突発的重力波カタログ, Gravitational-Wave Transient Catalog-3) は、**ライゴ (LIGO)**、**ヴィルゴ (Virgo)**、および **KAGRA (かぐら)** から提供される、3番目の突発的重力波カタログです。GWTC-3は、2019年11月から2020年3月まで続いた第3期観測期間の後半 (O3b) で検出された重力波イベントをこれまでのカタログに加えて更新したものです。その結果として、GWTC-3は、現在までに観測されたイベントをすべて集めた最大の重力波カタログです。

まずは、これまでの重力波カタログの復習からはじめましょう。

- **GWTC-1** は、第1期と第2期の観測期間 (O1とO2) で検出された11個のイベントを含んだカタログでした。
- **GWTC-2** は、O1, O2, と第3期前半 (O3a) で得られた全部で50個のイベントを含んだカタログでした。
- **GWTC-2.1** は、O3a中に検出されたイベントの定義を見直した結果、新たに8個のイベントを加え、GWTC-2の3個のイベントを除いたカタログでした。ここでは、**天体物理学的な信号である確率が50%より小さなイベント候補を除くこと**にしました (以下の「重力波の検出」の項を参照してください)。結果として全部で55個のイベントを含んだカタログになりました。
- **GWTC-3** (今回のカタログ) では、O3b中に検出された35個のイベントを追加し、現在までに観測されている合計90個のイベントを含むカタログになりました。(以下の**図3**は、膨大に増えてきた検出イベントの質量分布を示しています。)

O3bの最後 (2020年4月) には、KAGRAがLIGOとVirgoに加わりました。KAGRAは、ドイツにある**GEO 600**との共同観測を2週間実施しました。この観測の結果については、別に報告します。

これまでの私たちの重力波観測はすべて、**ブラックホールや中性子星**からなる連星の合体を波源とするものです。これらを**コンパクト天体**と呼び、私たちは、これらが巨大な星の残骸であると想定しています。重力波のイベントには、**連星ブラックホールの合体**、**連星中性子星の合体**、**中性子星-ブラックホールの合体**の組み合わせがあります。私たちの検出器の感度がより上昇するにつれて、重力波イベントの発見効率は劇的に改善されてきました。2015年に最初の検出を行ってからの、長い道のりの成果です。

この要約には、データの収集方法、検出方法、連星合体イベントの特徴の推定方法、GWTC-3のハイライト、および将来計画されている観測について書かれています。

重力波検出器

長年にわたる検出器の改良とデータの質の向上、そして解析手法の改善の組み合わせにより、LIGOとVirgoの感度は向上してきました。重力波検出器の感度を測定する方法はいくつかあります。1つは、検出器が典型的な連星中性子星の合体を検出できるおおよその距離を推定することです。検出可能な距離が大きいほど、

より速くの信号を検出できるため、より多くの検出が期待できます。O3はO3aとO3bの2つの観測期間に分かれており、その間の2019年10月に1か月の休止期間がありました。この1ヶ月の休止期間中に、多くのアップグレードと修理が行われました。その中には、LIGOのリヴィングストン (Livingston) 検出器での**鏡のクリーニング**、LIGOのハンフォード (Hanford) 検出器での真空装置の交換、Virgoでの**レーザー強度の増大**



LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2021年11月7日)
<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

LIGOとVirgoの第3観測期間のブラックホールと中性子星の母集団の統計

Introduction

ブラックホールや中性子星のような、**コンパクト天体**で構成される連星の合体による個々の重力波イベントからは、固有の重力波源の特性を明らかにすることができません。しかし、これらの連星系が宇宙全体でどのように形成され進化してきたかを明らかにするためには、多くの重力波イベントを観測して母集団の統計を明らかにする必要があります。コンパクト天体の質量とスピンの分布を測定することは、連星系の形成過程を明らかにすることにつながるため、私たちは、特に注目しています。

科学者たちは、コンパクト天体の連星系が宇宙で形成される可能性として2つの方法に焦点を当ててきました。以下では2つの「チャンネル」と呼ぶことにします。**孤立した連星進化チャンネル**では、巨大な恒星がつくる連星が共に進化し、それぞれが最終的に爆発して、中性子星またはブラックホールになったコンパクトな連星が形成された、と考えます。**動的形成チャンネル**では、**球状星団**や**中心核星団**のような密集した環境で、中性子星やブラックホールが結合して連星系を形成する、と考えます。これらの形成チャンネルはどちらも、重力波で検出されるコンパクト天体の観測可能な量に独自の特徴を残します。LIGOによって検出可能な重力波源は、太陽質量 (記号 M_{\odot} で表します) の1倍から100倍の範囲を広くカバーすると予想されます。しかし、天体物理学的プロセスが異なると、この質量の範囲全体で、ブラックホールや中性子星が検出されない領域が生じる可能性があります。たとえば、**X線と重力波**による最近のコンパクト天体の観測では、 $3\sim 5 M_{\odot}$ の範囲に**低い質量ギャップ**が存在し、最も質量の大きい中性子星と最も質量の小さいブラックホールの間に空白があることが示唆されています。この空白は、**巨大星がどのように死ぬかを支配する物理的メカニズム**によって説明される可能性があります。また、**脈動対不安定型超新星**の理論によって、ブラックホールには、約50から120 M_{\odot} の範囲で、**高い質量ギャップ**

があることが予測されています。この場合、瀕死の星の外層が放出され、質量の小さいブラックホールが残るか、残骸がまったく残りません。したがって、これらのギャップのどちらかまたは両方が存在すれば、私たちは、巨大な星がどのように一生を終わらせるかについて学ぶことができます。

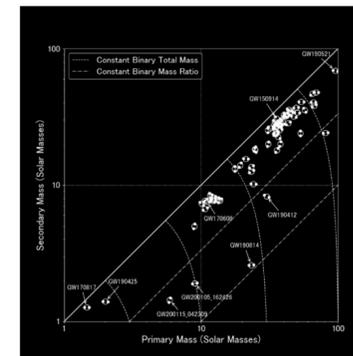


図1: 私たちの論文で統計解析された連星系の母集団。横軸に大きい方の天体の質量、縦軸に小さい方の天体の質量を表す。関心を引く個々のイベントをマークしている。また、連星の質量比と総質量の線も示す。(Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGF AE / Thomas Dent.)

コンパクト連星系の形成史を解くもう1つの重要な特徴は、構成天体の自転 (スピン) 軸の公転軌道軸に対する方向です。たとえば、地球が、太陽の周りの公転軸に対して、自転軸をわずかに傾けていることが、季節の原因になっています。孤立して形成されたコンパクト連星では、通常自転軸が軌道の公転軸と同じ向きを向いているのに対し、動的に形成された連星は自転軸がランダムな方向を向いている可能性があります。重力波で調べることができる3番目の重要な観測可能な

理科年表2024 (2023年11月発売)

重力波

天79(155)

重力波

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、宇宙初期に起源を持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、O3bと呼ばれる観測期間終了までに、BBH波源の重力波が85例、BNS波源が2例、NSBH波源が2例、片方がBHで相方が不明なもの1例の合計90例が報告されている。日本のKAGRA（かぐら）もO3bの最後に共同観測に入った。O4観測が、2023年5月から18ヵ月間の予定で行われている。

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
(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)

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	
O4	2023 5 26 -		2023 後半より開始		2023 5 26 - 2023 6 25, 2024 春に再開	

観測された中で特筆すべきイベント 突発的重力波カタログ3 (GWTC3) として2021年11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 ($2\rho_{\text{nuc}}$) $= 3.5_{-1.7}^{+2.7} \times 10^{34} \text{ dyn/cm}^2$ (90%信頼区間) である。γ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 1×10^{-15} 以下と制限された。また、可視・赤外における

天80(156)

天文

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 明らかに質量比の異なるBBHからの重力波で、重力波の高次モードの検出がなされた。GW190425 2番目に発見されたBNS。GW190521 総質量が最大のBBHで、合体後の質量が $150M_{\odot}$ 程度と考えられる。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。BBHの合体の第2世代の合体とも考えられている。GW190814 星の進化のシナリオでは直接形成が困難とされる $2-5M_{\odot}$ の質量領域のコンパクト天体からの重力波と考えられる。GW190924 現在までで最小質量のBBH。GW200115 初めて高い確度でNSBH合体として報告されたイベント。

報告されたおもな重力波 (2023年6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 χ_{eff} 、最終的に形成されたBHの質量 M_{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) $(\Delta\theta)^2$ 、シグナル・ノイズ比を示す。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17.3より大きいもののみ。)

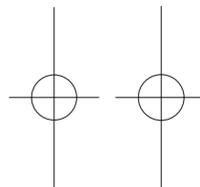
イベント (BBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{final}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	28.6 ⁺¹⁷ ₋₁₅	0.86	-0.01 ^{+0.12} _{-0.13}	63.1 ⁺³⁴ ₋₃₀	440 ⁺¹⁵⁰ ₋₁₇₀	182	26
GW170814	24.1 ⁺¹⁴ ₋₁₁	0.82	0.07 ^{+0.12} _{-0.12}	53.2 ⁺³² ₋₂₄	600 ⁺¹⁵⁰ ₋₂₂₀	92	17.7
GW190412	13.3 ^{+0.5} _{-0.5}	0.32	0.21 ^{+0.12} _{-0.13}	35.6 ⁺⁴⁸ ₋₄₅	720 ⁺²⁴⁰ ₋₂₂₀	240	19.8
GW190521	63.3 ⁺¹⁹⁶ ₋₁₄₆	0.58	-0.14 ^{+0.5} _{-0.45}	147.4 ⁺⁴⁰⁰ ₋₁₆₀	3310 ⁺²⁷⁹⁰ ₋₁₈₀₀	1000	14.3
GW190521_074359	32.8 ⁺³² ₋₂₈	0.77	0.1 ^{+0.13} _{-0.13}	72.6 ⁺⁶⁵ ₋₅₄	1080 ⁺⁵⁸⁰ ₋₅₃₀	470	25.9
GW190814	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
GW191109_010717	47.5 ⁺⁹⁶ ₋₇₅	0.72	-0.29 ^{+0.42} _{-0.51}	107 ⁺¹⁸⁰ ₋₁₅₀	1290 ⁺¹¹³⁰ ₋₆₅₀	1600	17.3
GW191204_171526	8.55 ^{+0.38} _{-0.27}	0.69	0.16 ^{+0.08} _{-0.05}	19.21 ^{+1.79} _{-0.95}	650 ⁺¹⁹⁰ ₋₂₅₀	350	17.5
GW191216_213338	8.33 ^{+0.22} _{-0.19}	0.64	0.11 ^{+0.13} _{-0.06}	18.87 ^{+2.8} _{-0.94}	340 ⁺¹²⁰ ₋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}	60.3 ^{+4.0} _{-3.3}	900 ⁺²⁹⁰ ₋₃₈₀	130	26.8
GW200224_222234	31.1 ^{+3.2} _{-2.6}	0.81	0.1 ^{+0.15} _{-0.15}	68.6 ^{+6.6} _{-4.7}	1710 ⁺⁴⁹⁰ ₋₆₄₀	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

イベント (BNS)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	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	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW190917_114630	3.7 ^{+0.2} _{-0.2}	0.22	-0.08 ^{+0.21} _{-0.43}	11.6 ^{+3.1} _{-2.9}	720 ⁺³⁰⁰ ₋₃₁₀	2100	8.3
GW200115_042309	2.43 ^{+0.05} _{-0.07}	0.24	-0.15 ^{+0.24} _{-0.42}	7.2 ^{+1.8} _{-1.7}	290 ⁺¹⁵⁰ ₋₁₀₀	370	11.3

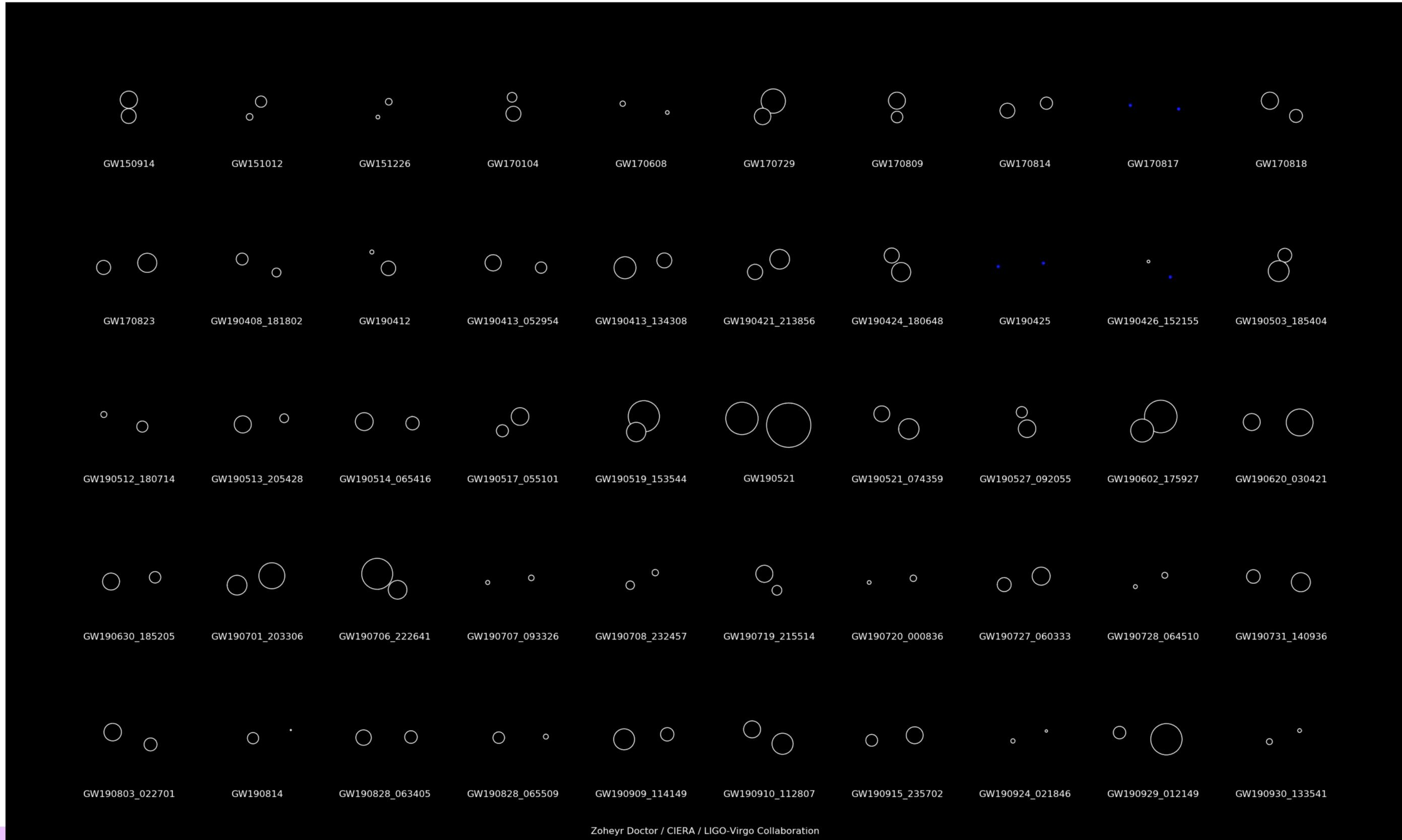
得られた科学的成果 連星系については、その合体頻度について、BBHは赤方偏移 $z = 0.2$ 付近において $17.9-44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、BNSは $10-1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、NSBHは $7.8-140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ と見積もられている。このほか、背景重力波に対して、宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として (平坦なエネルギースペクトルを仮定したうえで) $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ の上限が得られている。連続重力波の重力波振幅に対しては、おおよそ 1×10^{-25} 程度 (200 Hz あたり) 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。



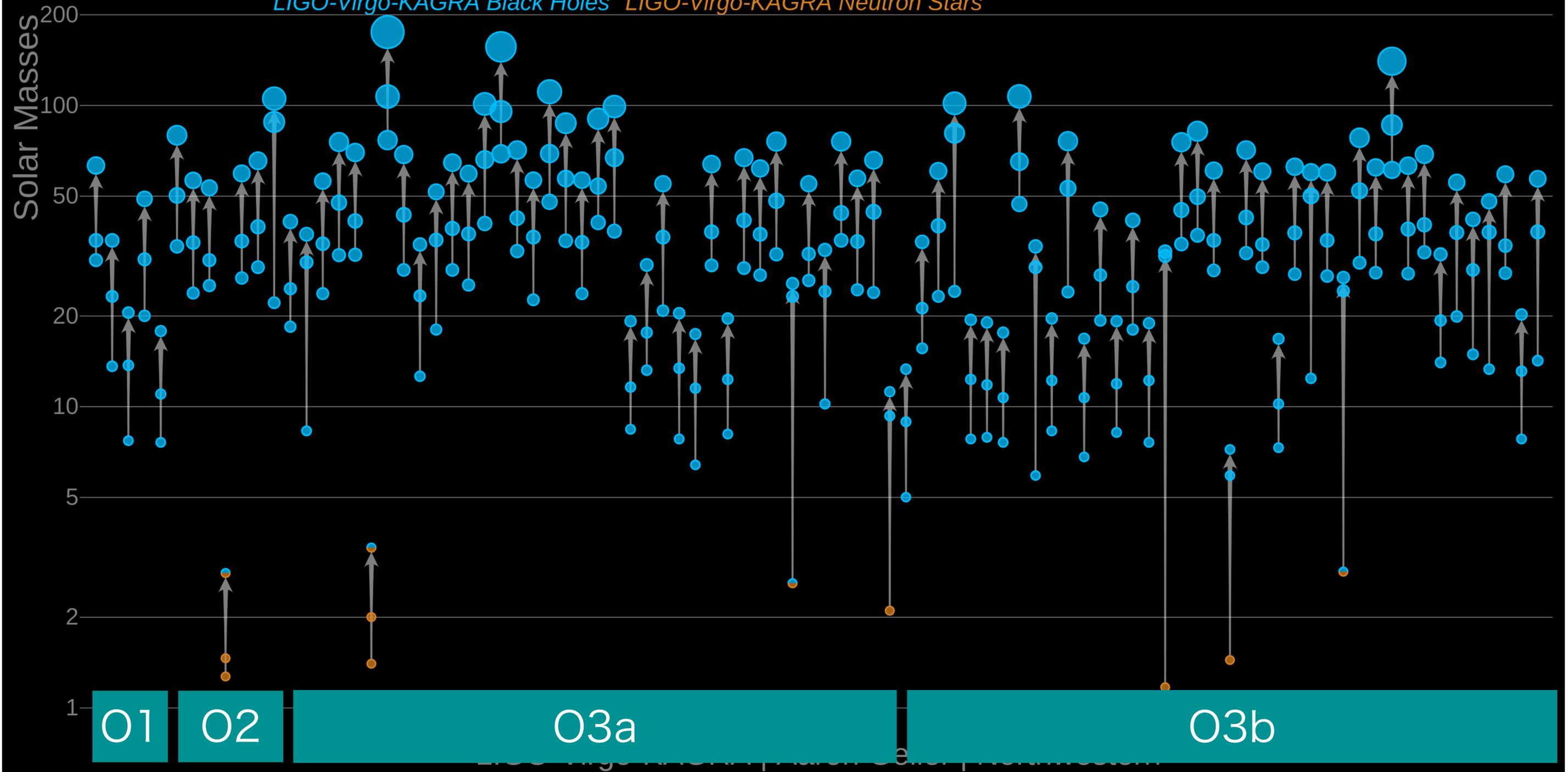
O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

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



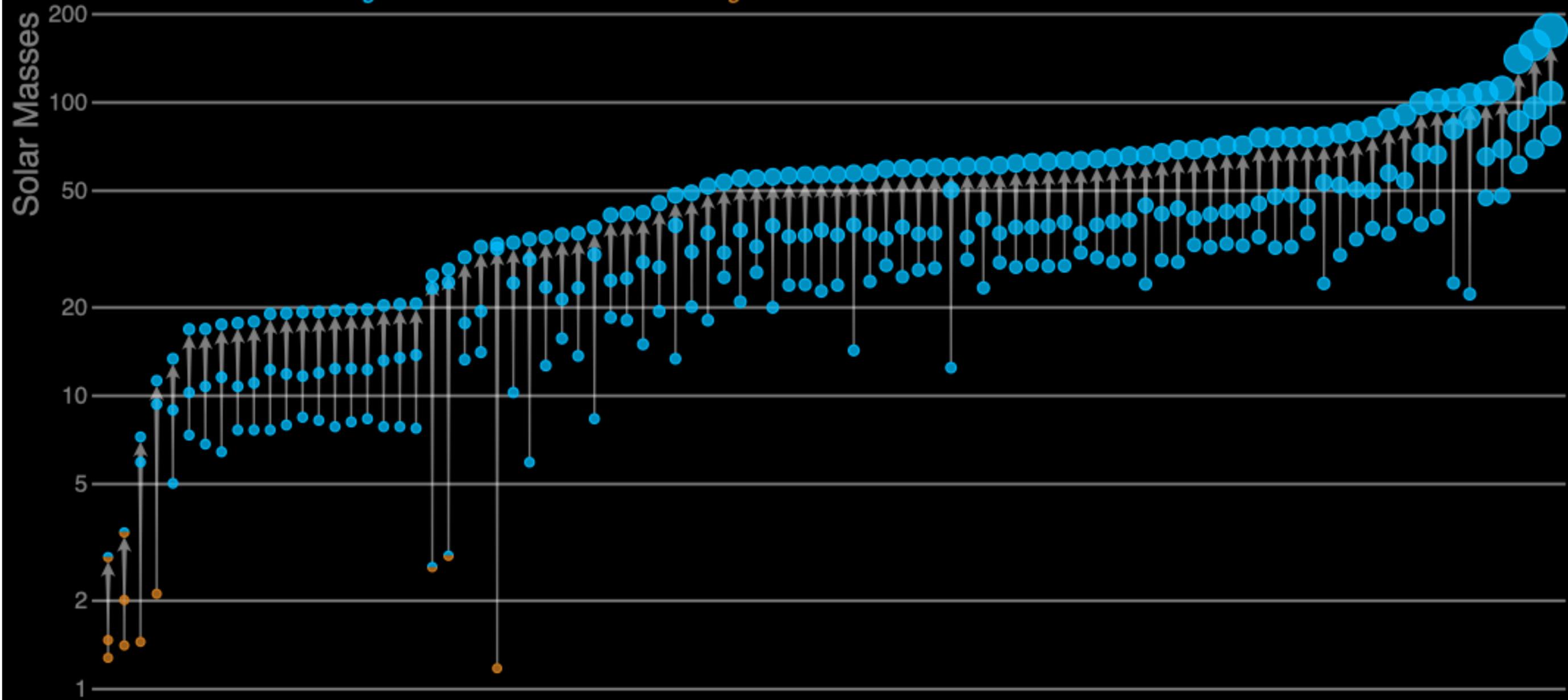
Masses in the Stellar Graveyard

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



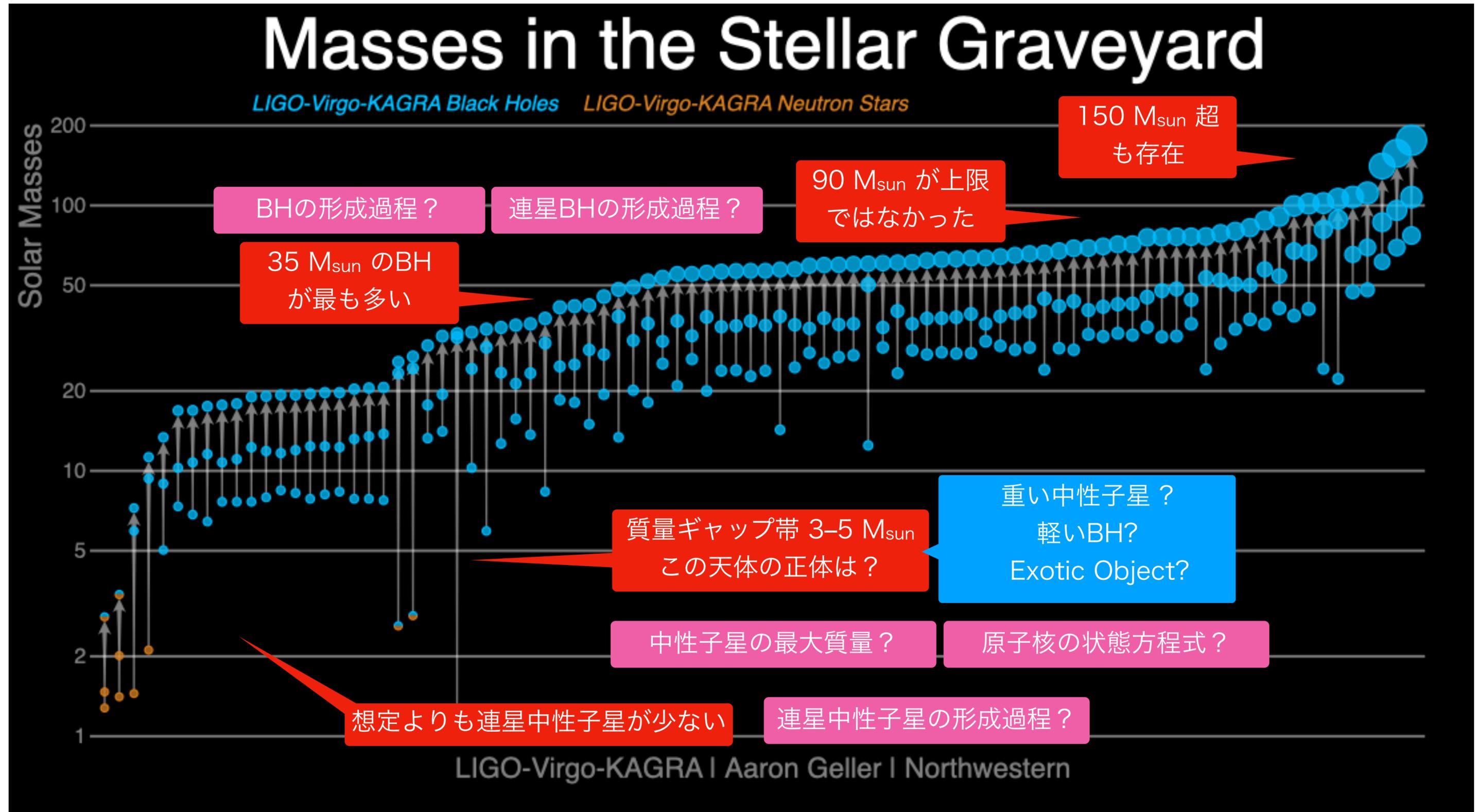
Masses in the Stellar Graveyard

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



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

この現状をどう説明する？



O4a (2023/5/26 - 2024/1/16)

GraceDB Public Alerts ▾ Latest Search Documentation Login

Please log in to view full database contents.

LIGO/Virgo/KAGRA Public Alerts

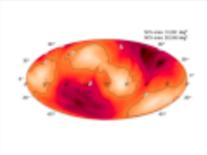
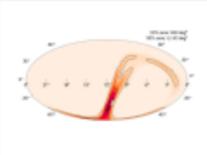
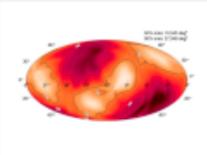
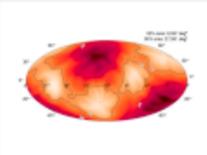
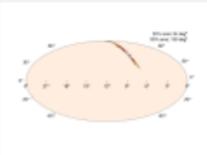
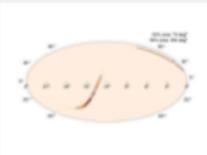
- More details about public alerts are provided in the [LIGO/Virgo/KAGRA Alerts User Guide](#).
- Retractions are marked in **red**. Retraction means that the candidate was manually vetted and is no longer considered a candidate of interest.
- Less-significant events are marked in **grey**, and are not manually vetted. Consult the [LVK Alerts User Guide](#) for more information on significance in O4.
- Less-significant events are not shown by default. Press "**Show All Public Events**" to show significant and less-significant events.

O4 Significant Detection Candidates: **81** (92 Total - 11 Retracted)

O4 Low Significance Detection Candidates: **1590** (Total)

<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O4/>

現在までに**81**イベント

Event ID	Possible Source (Probability)	Significant	UTC	GCN	Location	FAR	Comments
S240109a	BBH (99%)	Yes	Jan. 9, 2024 05:04:31 UTC	GCN Circular Query Notices VOE		1 per 4.3136 years	
S240107b	BBH (97%), Terrestrial (3%)	Yes	Jan. 7, 2024 01:32:15 UTC	GCN Circular Query Notices VOE		1.8411 per year	
S240104bl	BBH (>99%)	Yes	Jan. 4, 2024 16:49:32 UTC	GCN Circular Query Notices VOE		1 per 8.9137e+08 years	
S231231ag	BBH (>99%)	Yes	Dec. 31, 2023 15:40:16 UTC	GCN Circular Query Notices VOE		1 per 3.7932e+06 years	
S231226av	BBH (>99%)	Yes	Dec. 26, 2023 10:15:20 UTC	GCN Circular Query Notices VOE		1 per 2.8446e+42 years	
S231224e	BBH (>99%)	Yes	Dec. 24, 2023 02:43:21 UTC	GCN Circular Query Notices VOE		1 per 20.739 years	

重力波で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

→ 原子核の状態方程式

イベント頻度・統計

→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル

重力波で何がわかる？

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～

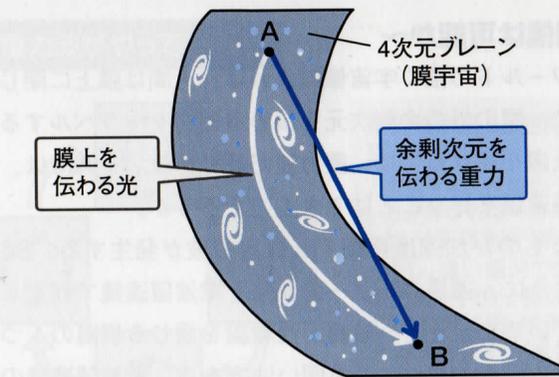
ブレンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

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れば、膜自身が曲がっていると考えるのが自然だろう。

このような宇宙を考えると、膜が曲がっている場合、重力の伝わる最短経路は膜の上である必要はない。重力は余剰次元を伝播できるから、場合によっては膜を伝わる重力よりも速く2点間を結んで伝わるのが可能になる。つまり、膜上のA点から重力が重力波として伝わり始めると、膜上のB点には、本来AB間の距離を光速で伝わって届く重力波よりも一足速く余剰次元を通った重力波が伝わることも可能になる。膜宇宙に生じる近道だ。星の爆発を望遠鏡で見るよりも、重力波信号の方が早く伝わることになりうる。

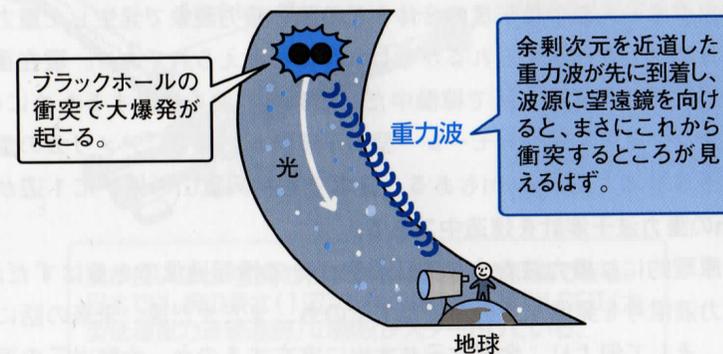
このような近道があるならば、ビッグバン宇宙モデルの問題点の1つだった「地平線問題」（112ページ）が解決できる可能性が指摘されている¹²⁴。また、石原秀樹^{いしはらひでき}は、近道を通った重力波信号によって、本来の因果関係を破って、未来からの情報が伝えられるかもしれないことも指摘している¹²⁵。

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!

ナツメ社

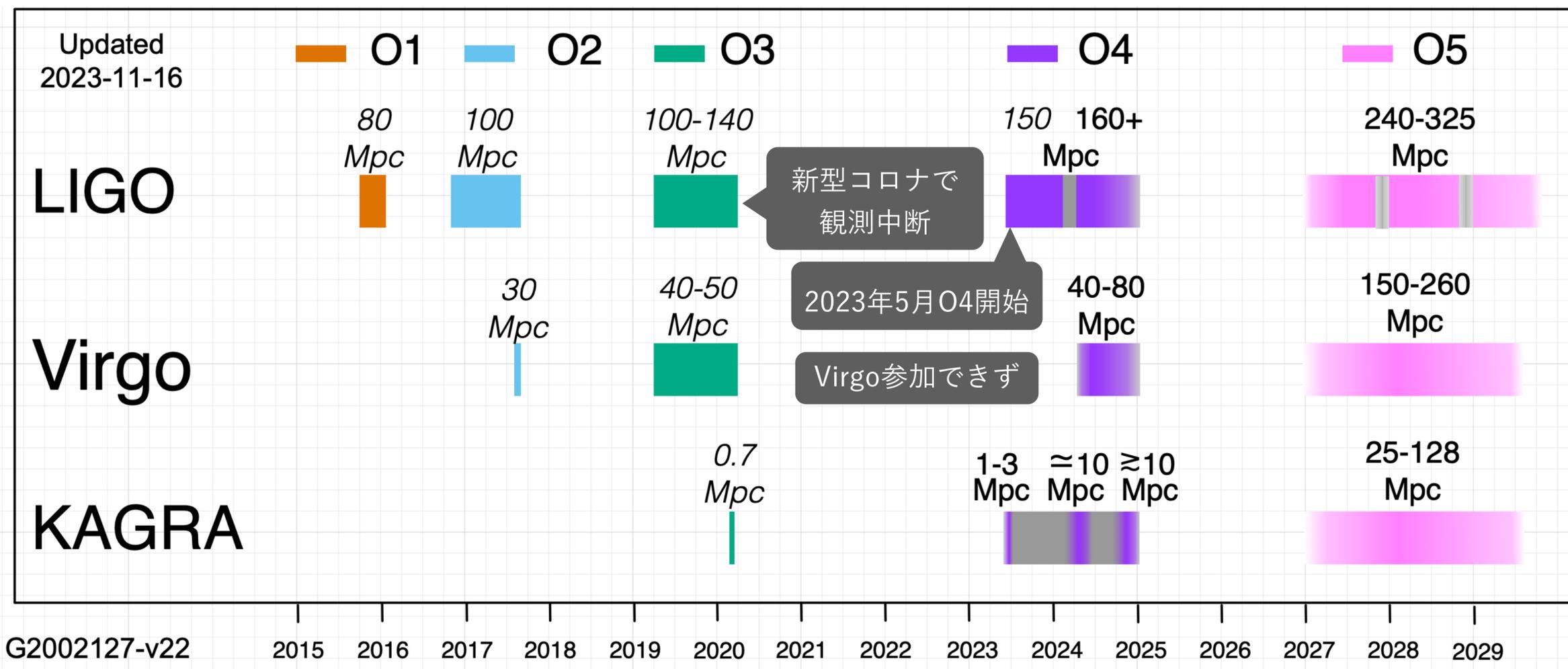
重力波観測は物理学から天文学へ

1. アインシュタインの相対性理論
2. 重力波が観測されるまで
3. 重力波が観測されてから
4. 日本のKAGRA
5. わからないこと
6. 将来計画

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



観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4a)



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

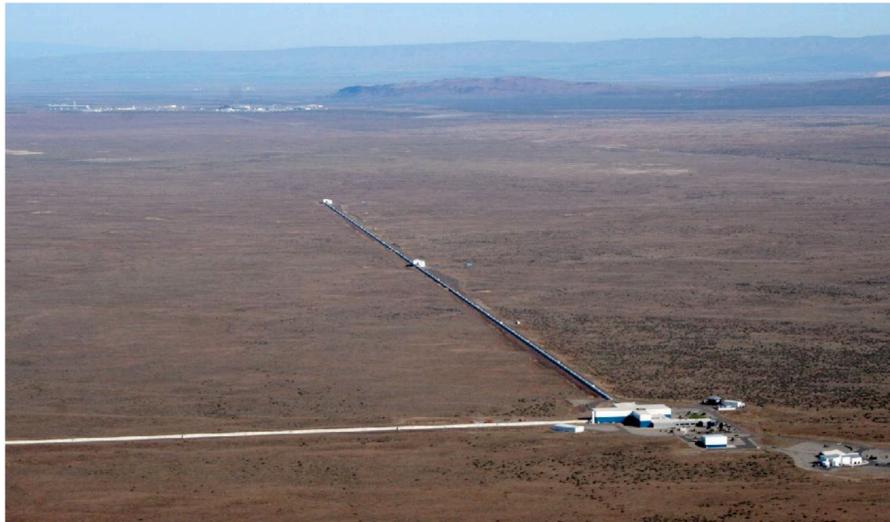


- GWTC-1
2018/12/3
 - GWTC-2
2020/10/28
 - GWTC-2.1
2021/8/2
 - GWTC-3
2021/11/5
- ↑
Today

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

2023年5月から 日米欧で重力波共同観測中

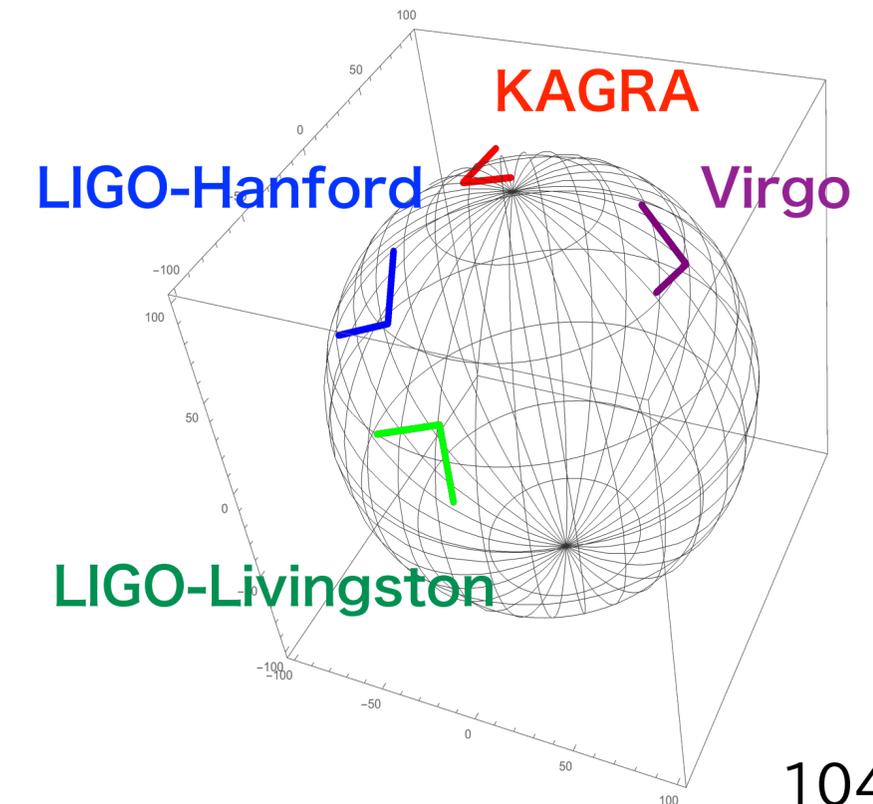
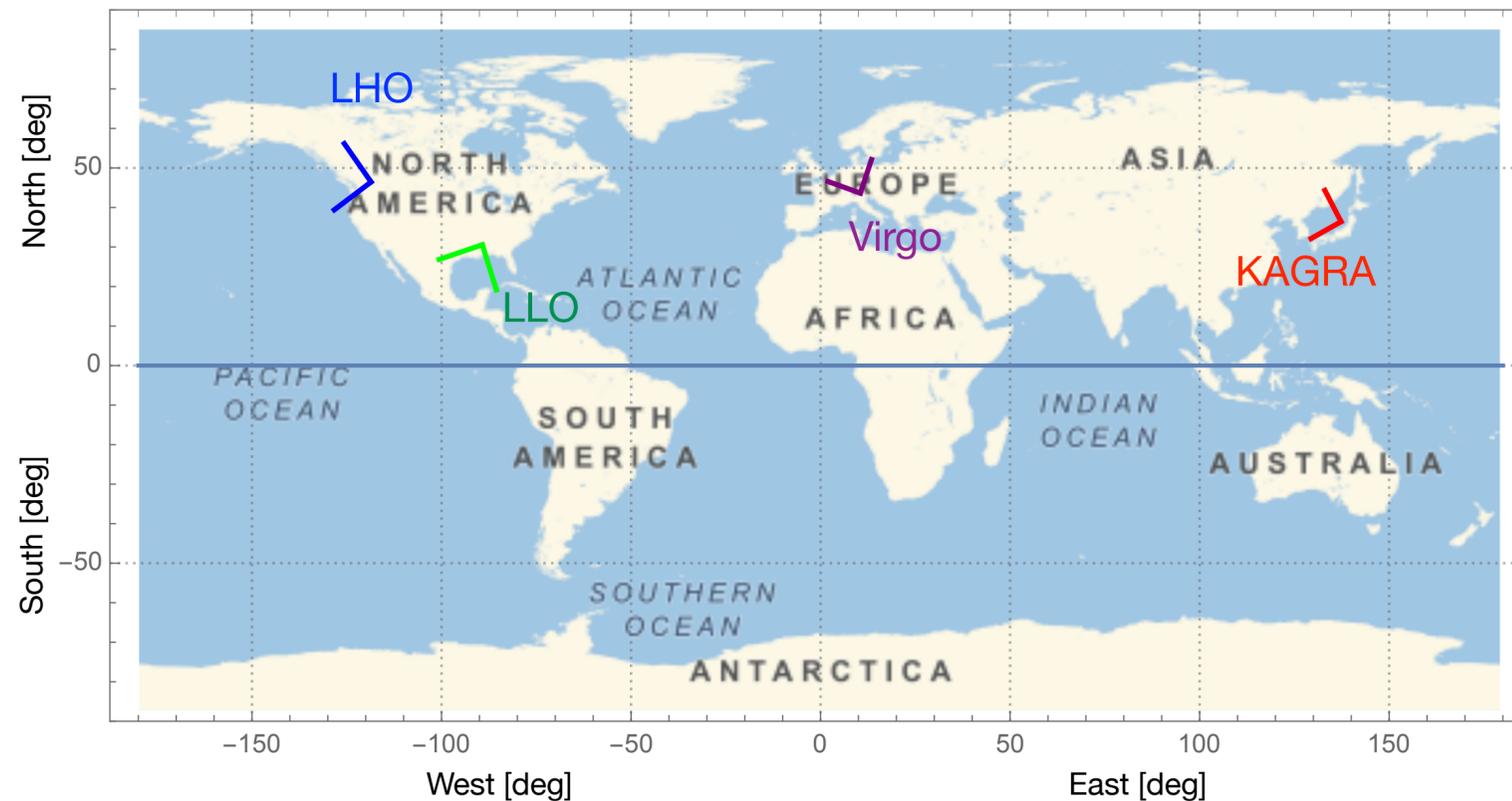
アメリカ・LIGO



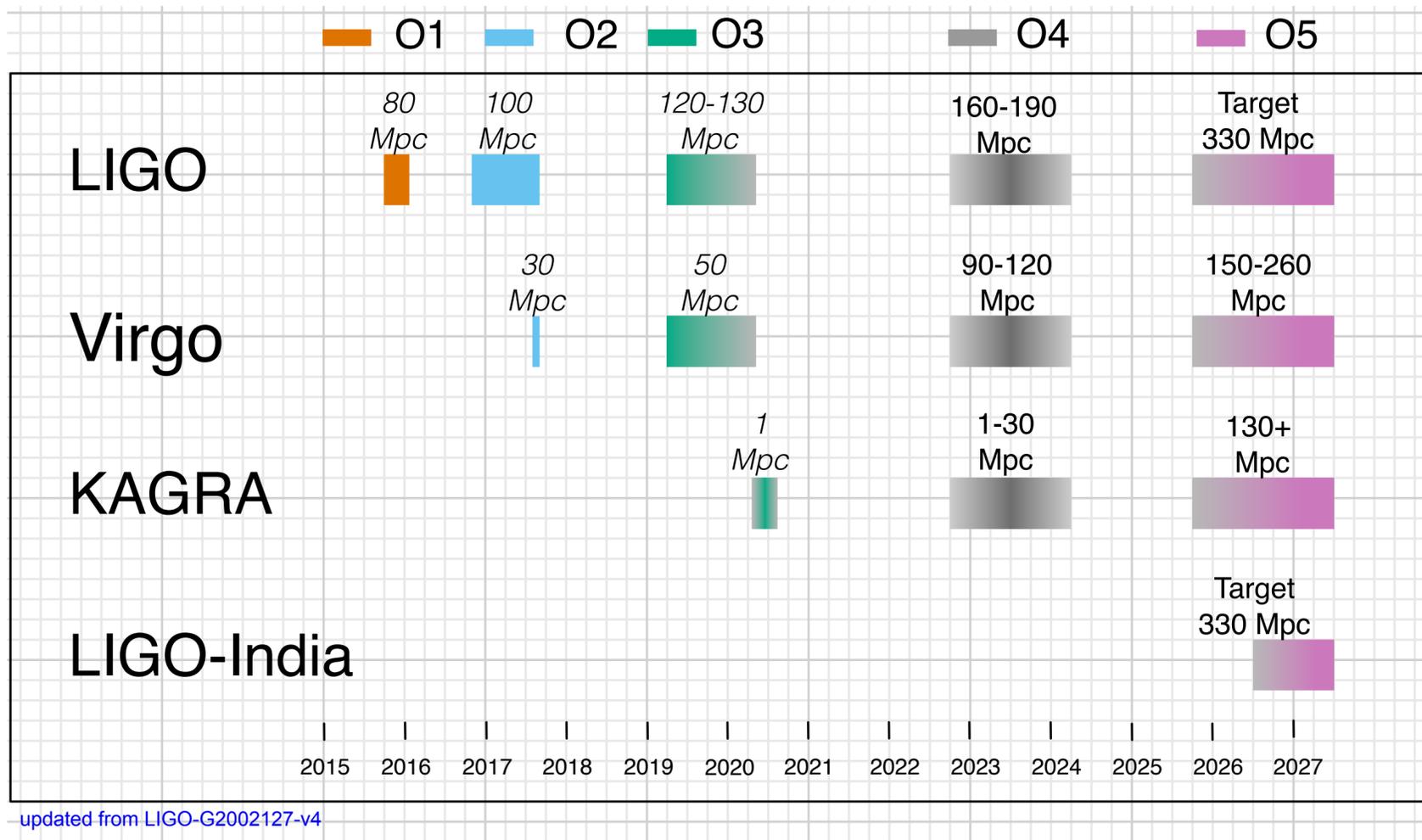
ヨーロッパ・VIRGO



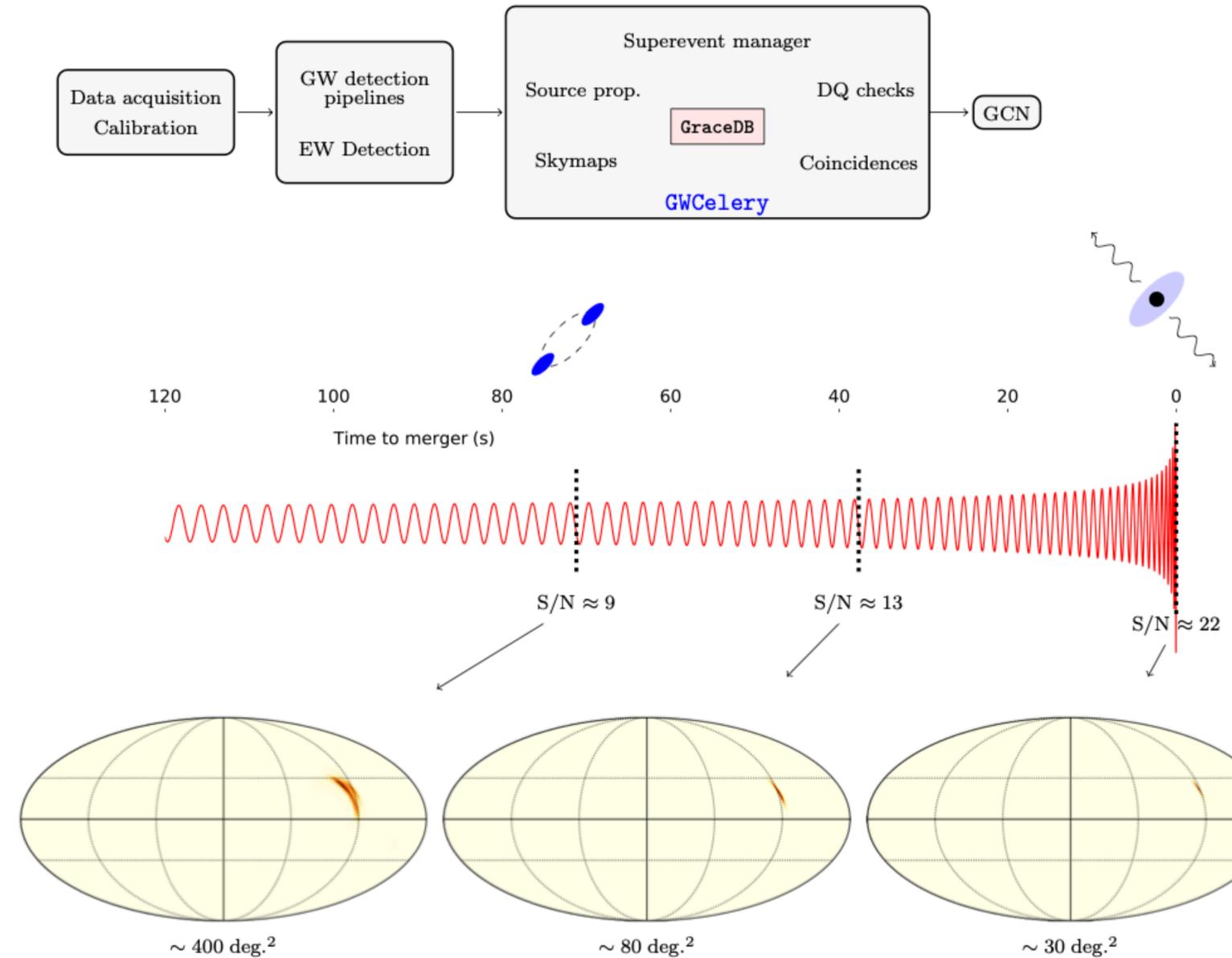
日本・KAGRA(岐阜・神岡)



観測スケジュール (Observation 4/5)



O5
LIGO-India 観測開始

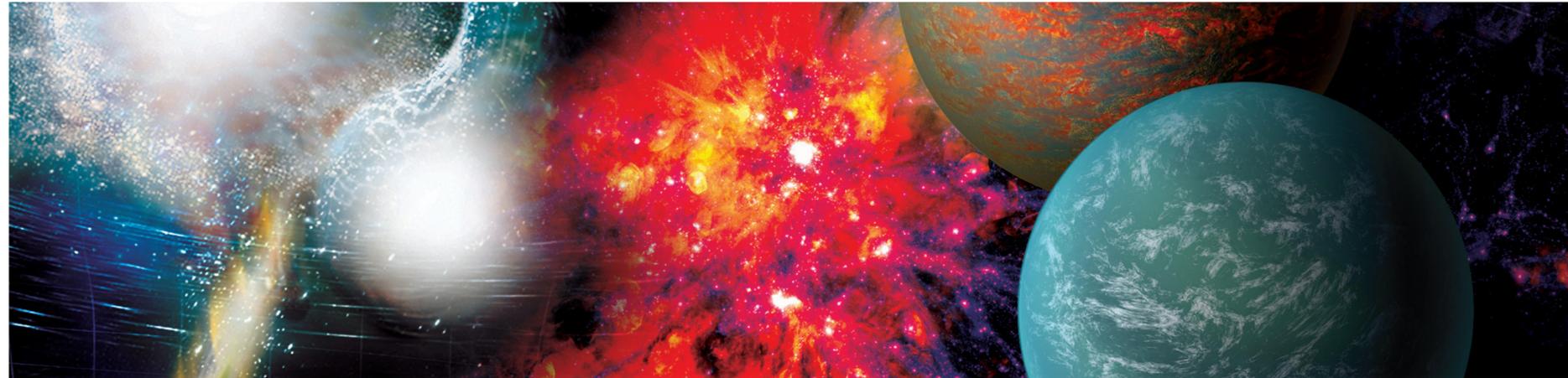


O5
連星合体前から
各天文台にアラート発信

R Magee et al 2021 ApJL 910 L21 [arXiv:2102.04555]

Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>



(i) Pathways to Habitable Worlds 地球外生命体はいるのか.

太陽系外惑星をその環境を決める中心星の性質と合わせて統一的に理解することを目指す。

(ii) New Windows on the Dynamic Universe 新しい「眼」で宇宙を観測する

従来の電磁波(可視光、赤外線、電波、X線、ガンマ線)に加えて、超高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、重力波という新たな観測手法を用いて、未知の物理学の開拓を目指す。

(iii) Drivers of Galaxy Growth 銀河進化を生態系として理解する

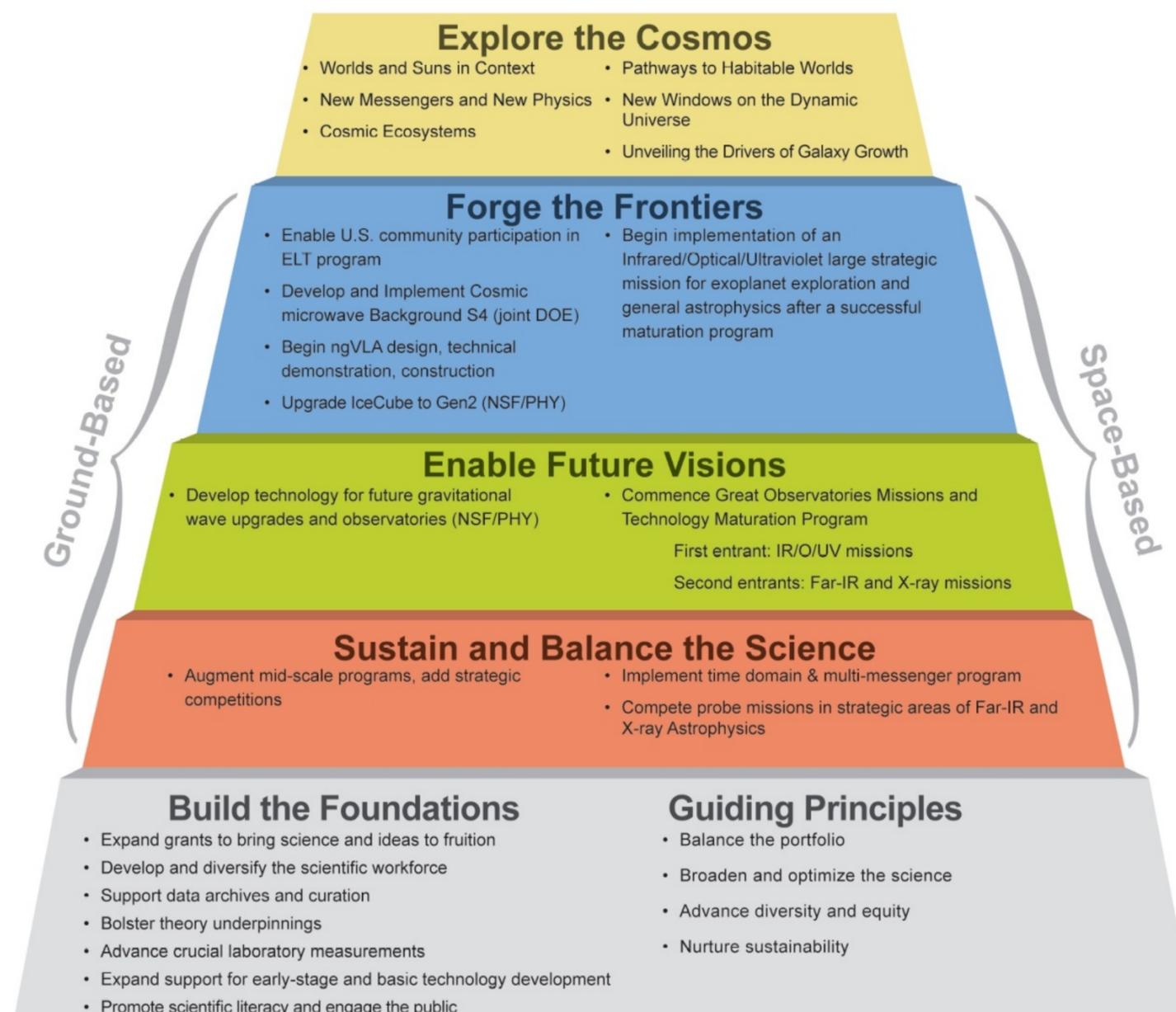
天体は、その化学的・力学的進化の最期に再び宇宙空間に戻って次世代の天体を形成する。
その基礎過程を解明する。

Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

Astro2020プログラム実現のための道筋と構造

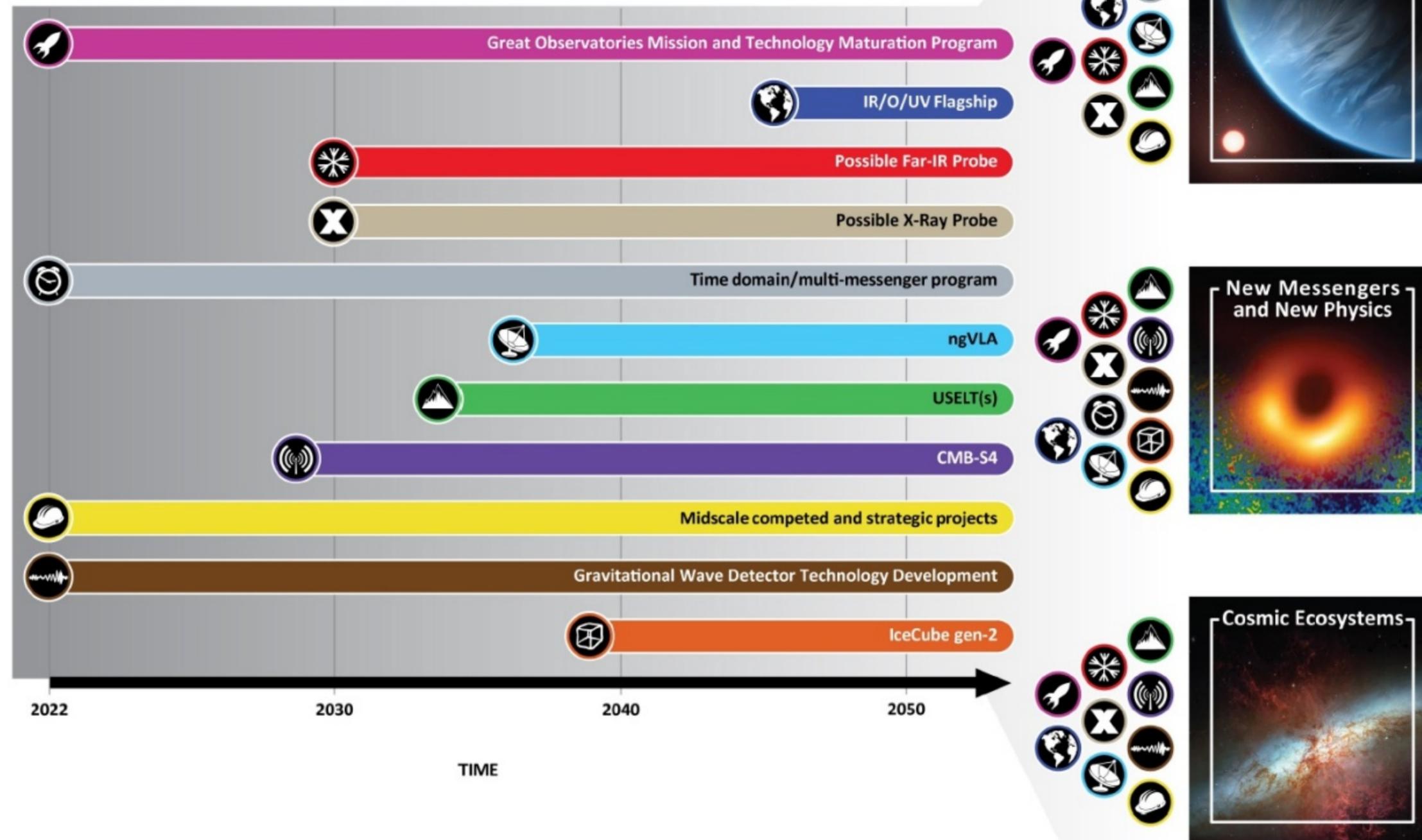
Realizing the Astro2020 Program: Pathways From Foundations to Frontiers



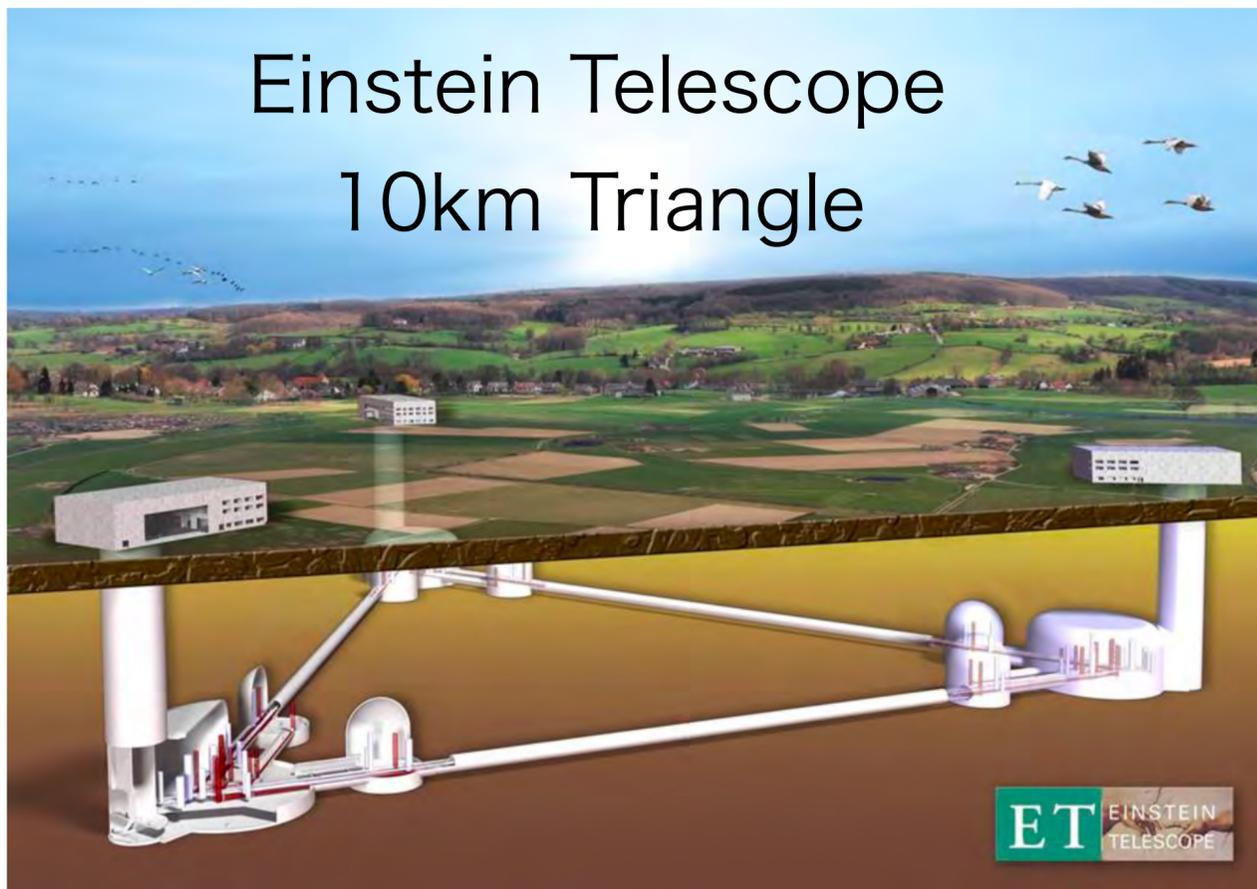
Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

Astro2020の将来計画予定年表



重力波観測装置(地上)の将来計画



◀ ヨーロッパの計画

予算承認

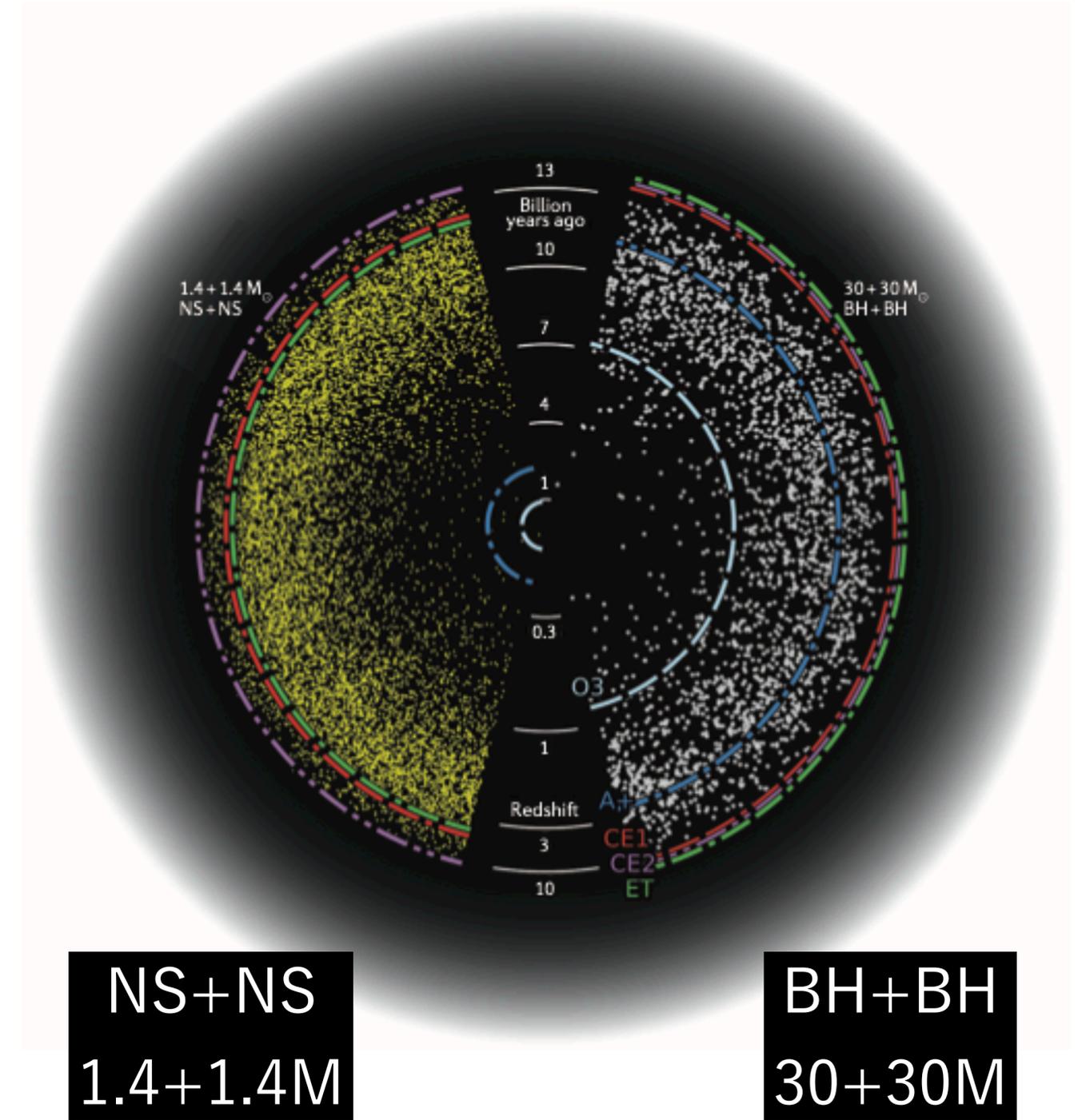
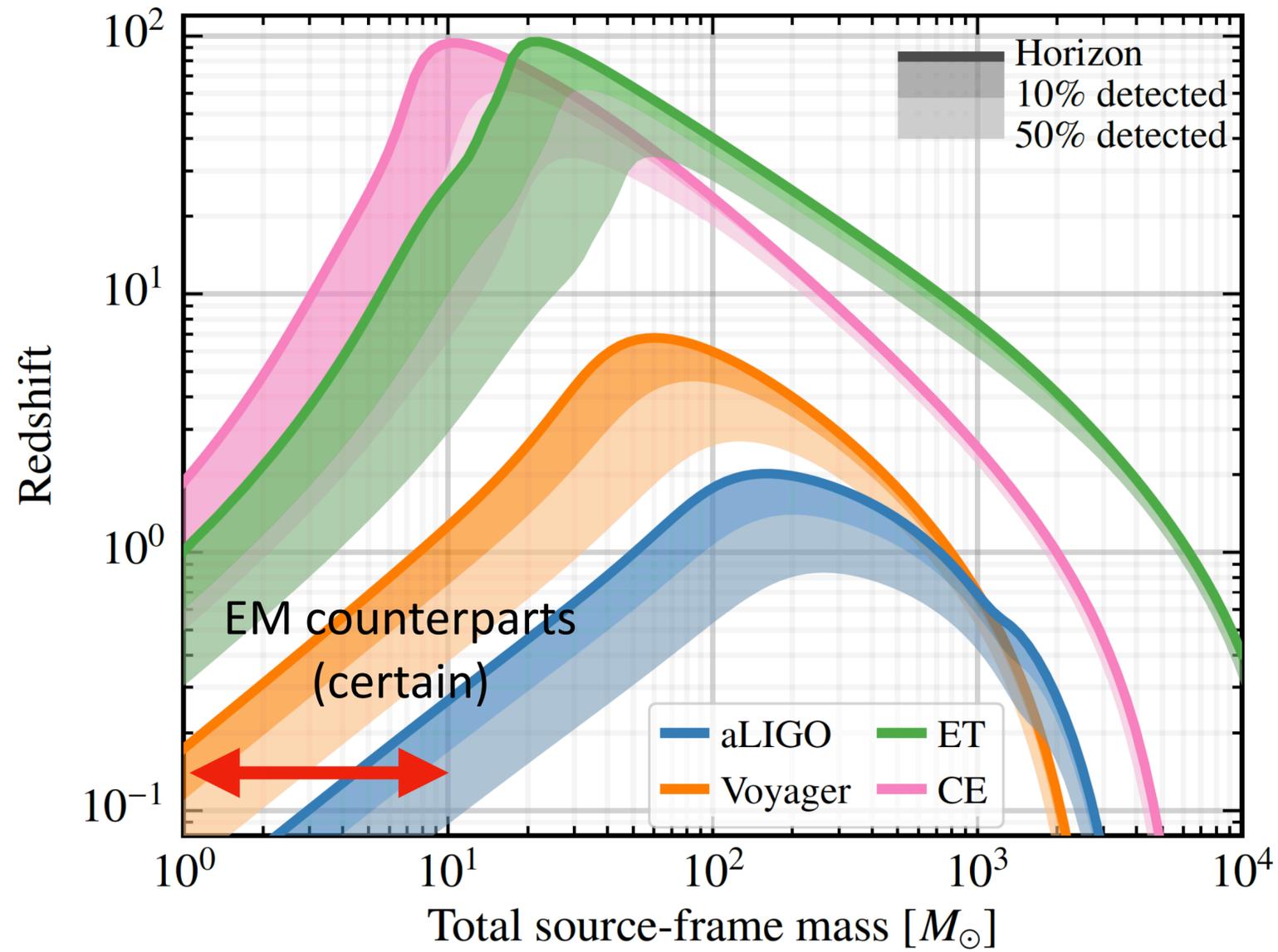
建設地未定(候補地2つ)

アメリカの計画 ▶

予算申請準備

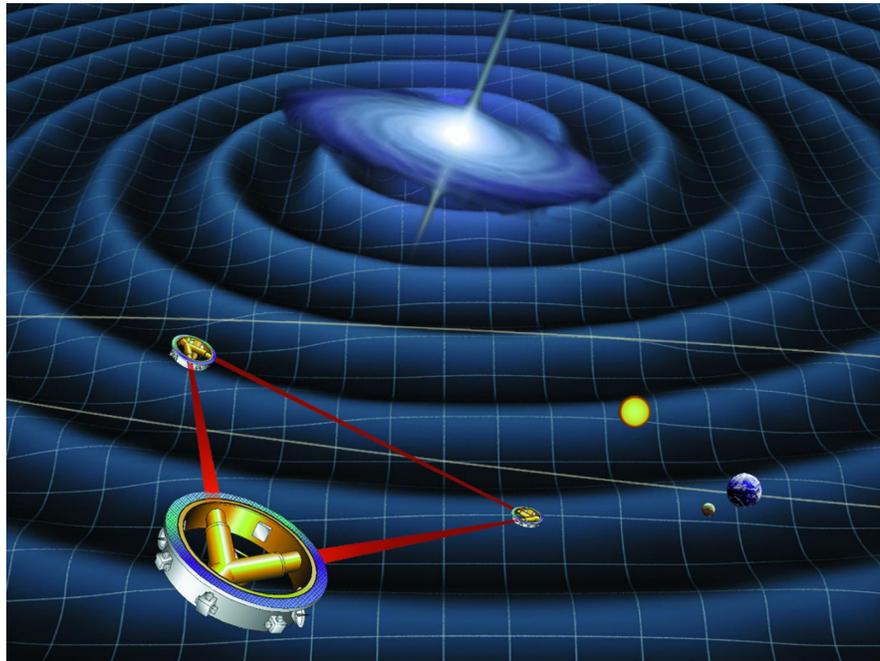


重力波観測装置(地上)の将来計画



Evan Hall, MIT

重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



◀ ヨーロッパの計画

予算承認

2034年頃打ち上げ, 3年間稼働

250万kmの腕の長さ

地球の公転軌道のL4

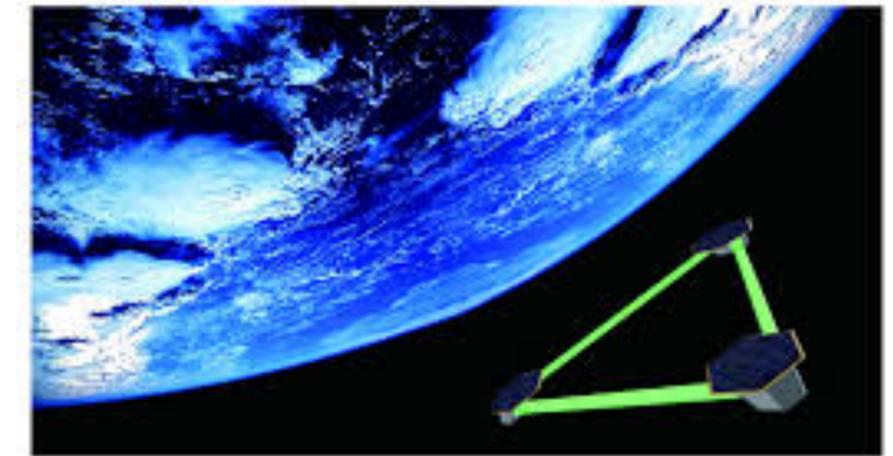
低周波数帯(mHzからHz帯)

日本の計画 ▶

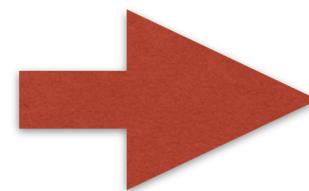
予算申請準備

1000kmの腕の長さ

低周波数帯(decihzからHz帯)

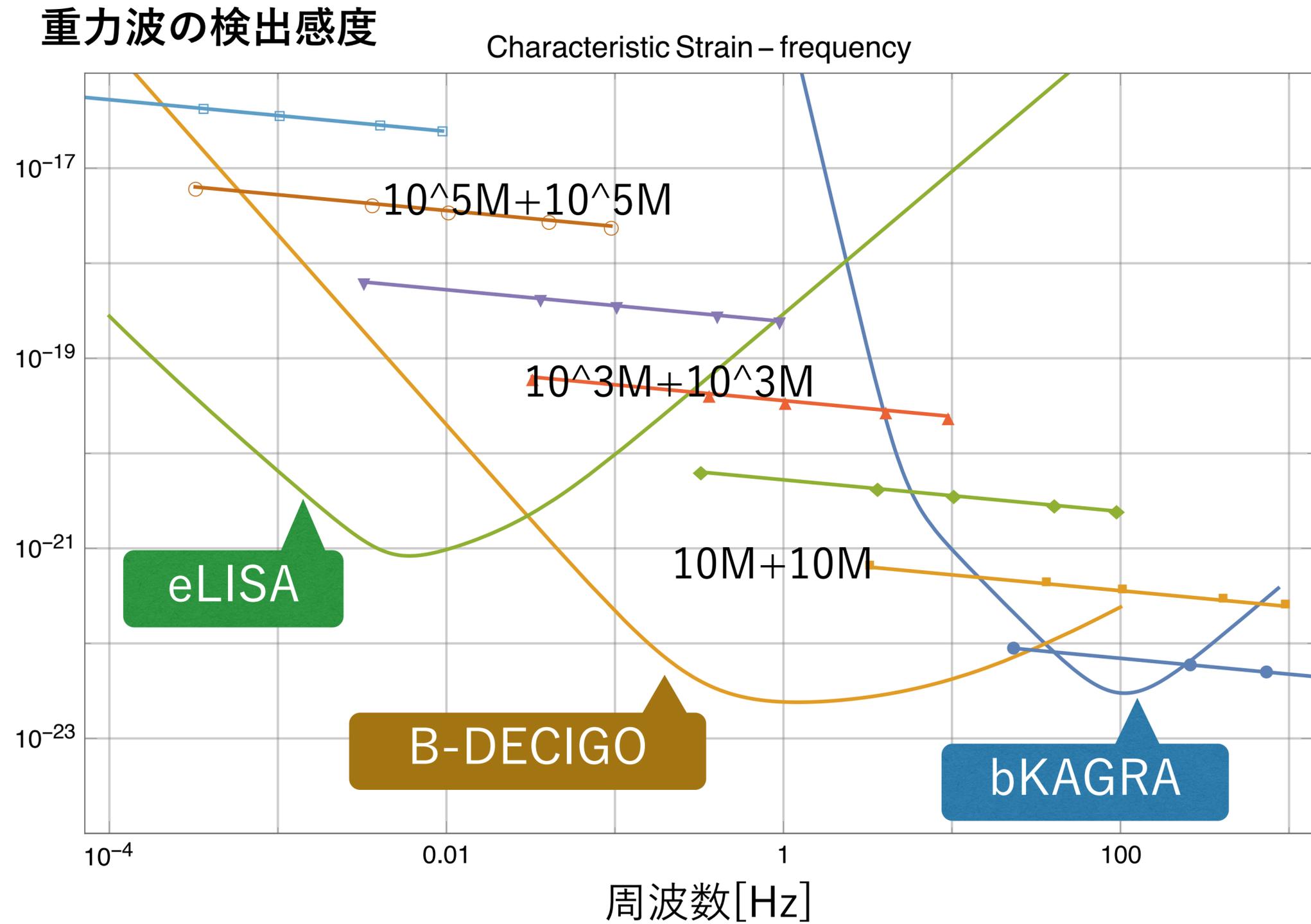


宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大BH形成過程がわかる
宇宙の膨張速度がわかる

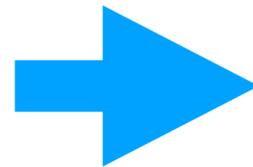
重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



重力波観測は物理学から天文学へ

わかったこと

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



わからないこと

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

重力波観測は、物理学から天文学へ

Sの科学 Yの科学

Sの科学

physics **s** 物理
 mathematics **s** 数学
 statistics **s** 統計学
 genetics **s** 遺伝学

Yの科学

astronomy **y** 天文学
 economy **y** 経済学
 biology **y** 生物学
 archaeology **y** 考古学
 anthropology **y** 人類学
 sociology **y** 社会学

体系化の学問

対象物の性質を理論で説明



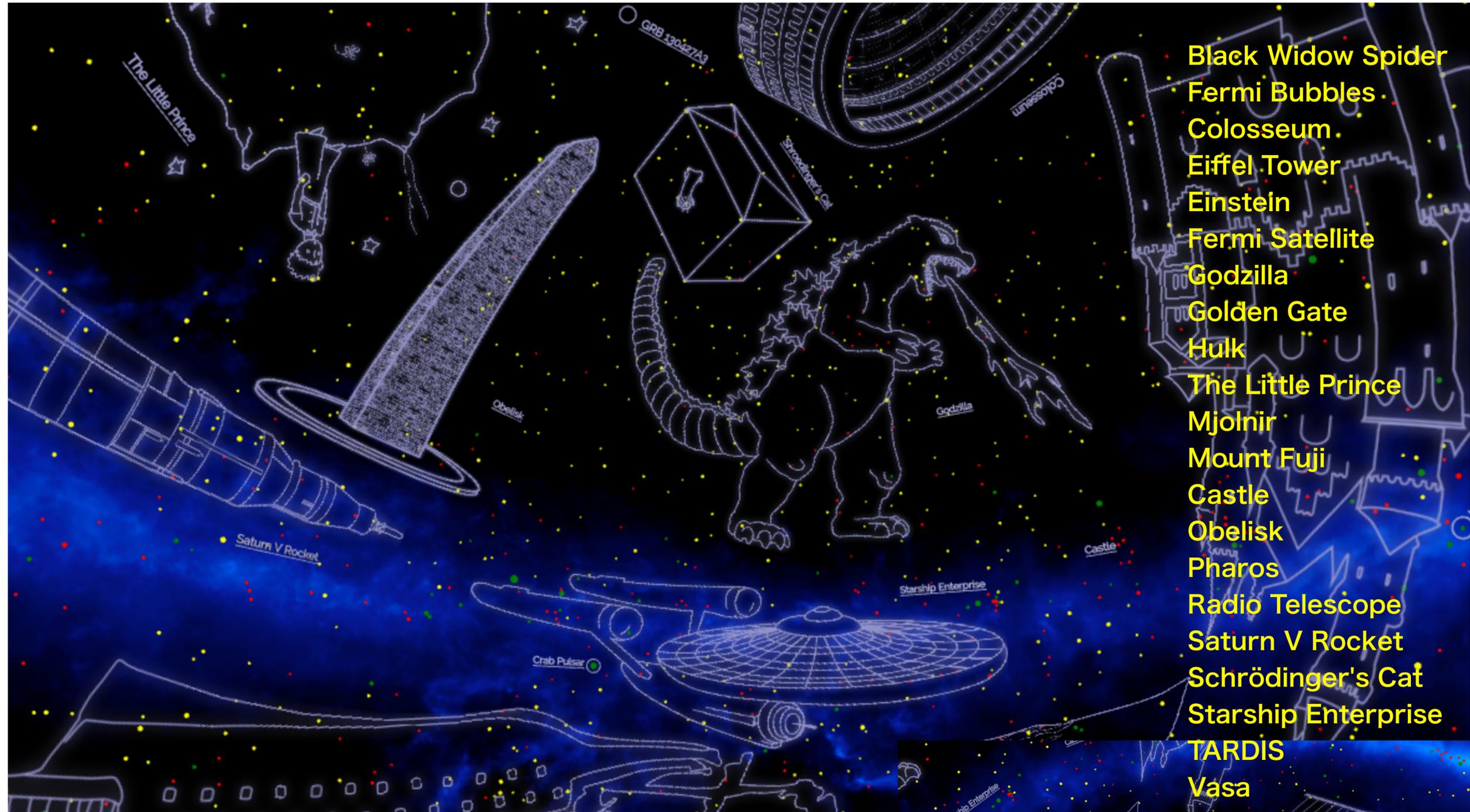
発見の学問

対象物を分類し記載

相対性理論



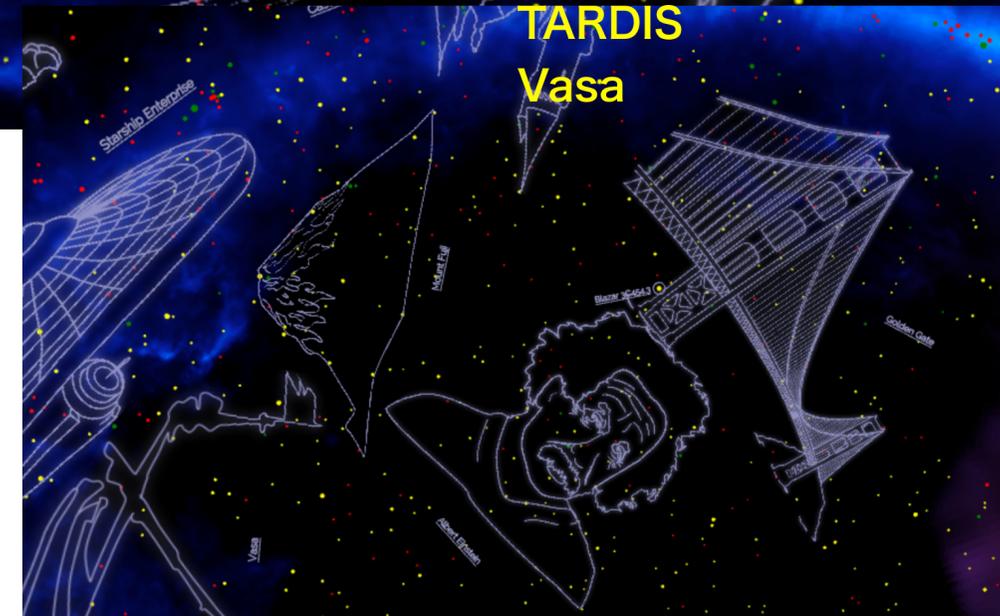
ブラックホール
 膨張宇宙
 重力波

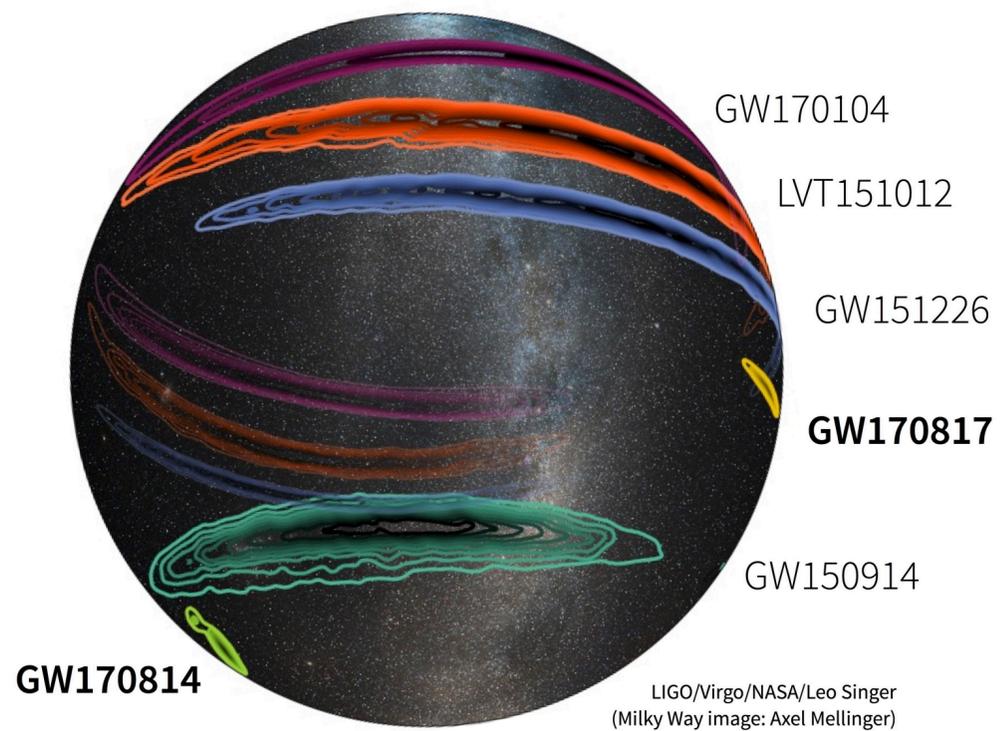


2018/10

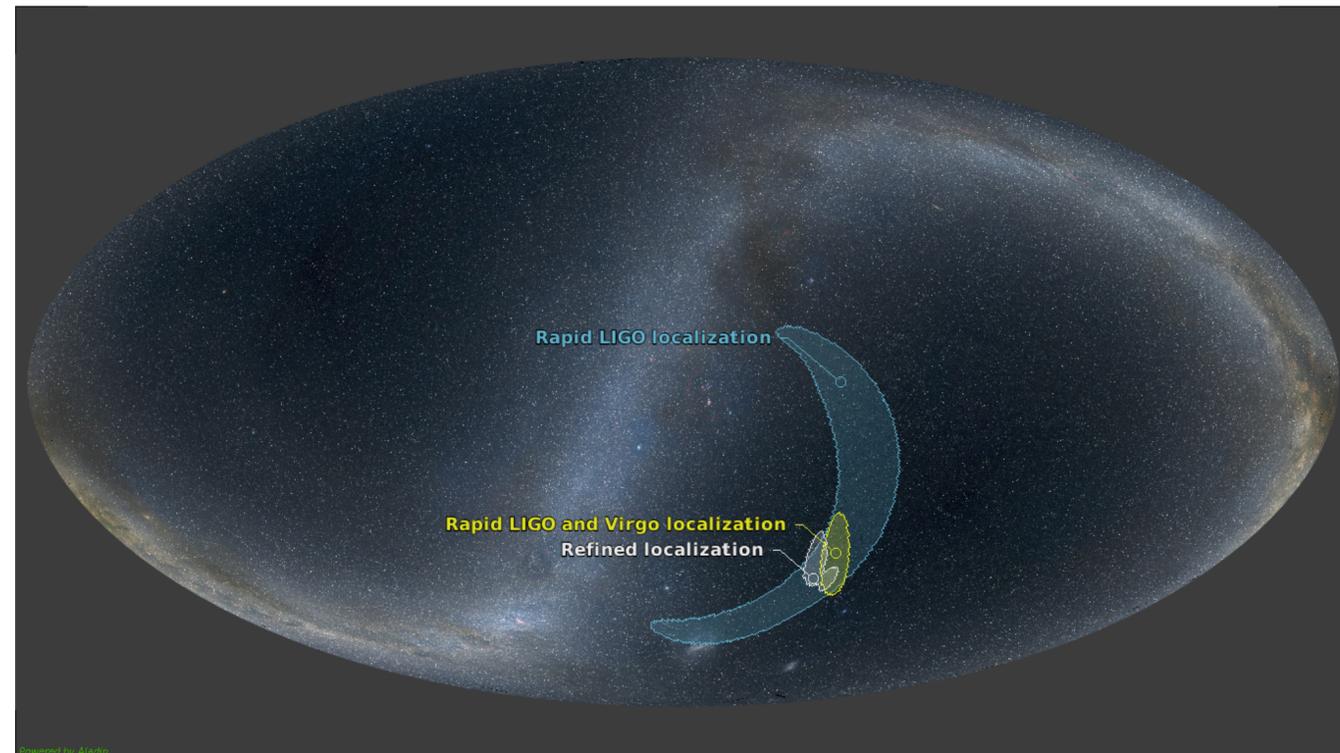
Fermi衛星チーム, ガンマ線バースト天体カ
タログで21星座を命名

<https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/constellations/>





<http://www.virgo-gw.eu/skymap.html>



重力波源が特定されたのは、まだ1つ。

NEWS ≡

202x/xx
LIGO/Virgo/KAGRAチーム、
重力波天体カタログで108星座を命名

しかし
O4観測がはじまれば、
週に数回、BH-BH
月に1回、NS-NS

宇宙空間での観測がはじまれば、
1日に10回、BH-BH ??