

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第9回 2025/11/17

第3章 現代物理学1：相対性理論（4）

真貝 寿明
Hisaaki Shinkai



似てると
言われます

真貝の武庫川講義ページtop



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

しし座流星群は、母天体であるテンペル・タットル彗星の公転軌道と地球の軌道が近づいている辺りを毎年この時期に地球が通過する際に、彗星が残した塵が地球の大気と衝突し、上空100km前後で発光して見える現象である。1999年や2001年の大出現が有名だが例年の出現数は少ない。次に大規模な出現が見られるのは2030年代と予想されている。

天文年鑑による予想では**1時間20個**
4時ごろに細い月が昇ってくるが影響は小さく、好条件





光子の裁判 ——ある日の夢——



朝永振一郎（ノーベル賞 1965）
「超多時間理論」と「くりこみ理論」，
量子電磁力学分野の基礎的研究

jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman "for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles".

"We must now describe the photon as going partly into each of two components into which the incident beam is split."

P. A. M. Dirac, *Principle of Quantum Mechanics*

一

光子の裁判

検 「それでは被告にたずねるが、被告は前から室内にひそんでいたのではないのであるか」
被 「そうです。私がその直前に部屋の外にいたということには確かな証拠があります。現にその直前、私は門のところにいたのです。すなわちそこで門衛が私をつかまえて、入門の手続きをとらせたのであります。このことはさきほど門衛の証言で明らかにされたとおりです」
検 「なるほど。門衛の証言によってその点についてはアリバイが成立しているとせねばなるまい。それでは聞くが、被告は門から前庭を通じて窓のところにいき、その窓から室内に侵入し、そして室内の壁のところで捕えられたというのだね」

被 「そのとおりです」

気がつくとは私は、何かの裁判を傍聴しているようです。法廷はよく写真などで見たように、正面に判事長が威儀を正して坐っており、中央の被告席には何の犯罪かよくわからないけれども、何かの犯行をおかしたらしい被告が神妙にひかえています。今尋問をしているのは検察官らしく、犯行の模様をいちいち念をおすように聞きだしているのです。

私は、いつのまにこんなところに来てきたのでありましょう。それをいぶかりながらも、これは何か面白い事件らしいぞと思ひながら、一生懸命に聞き耳をたてていました。検察官はさらに尋問をつづけました。

検 「その部屋には二つの窓が前庭にむいて並んでいる。被告はそのどちらの窓から侵入したのか。この点は非常に重要なことだから、はっきりと答弁してほしい」

これに対する被告の答は、はなはだ奇想天外なものでありました。

被 「私は二つの窓の両方を一緒に通って室内に入ったのです」

私はこの答に अच्छे にとられました。一体、一人の被告が二つの窓の両方を一緒に通るなどということが可能でしょうか。検察官もこの論理を無視した答に少なからず心証を害したようです。

検 「被告は二つの窓の両方を一緒に通ったと予審においても一度ならず主張していたが、ここで

課題

- 「光を波と考えるか，粒子と考えるか」の論争点は何か．現状ではどう理解するのが正しいか．
- 朝永振一郎の書いた『光子の裁判』(1949) のプリントを第9回の授業時に配布しています．この要旨をまとめてください．
- そして，次のキーワードから2つ以上を使って，論争点と解決案を説明してください．
『神はサイコロをふらない』『確率解釈』『不確定性原理』『観測問題』『シュレーディンガーの猫』
『EPR パラドックス』『トンネル効果』『コペンハーゲン解釈』『多世界解釈』
- 最後に，皆さんのこの問題に関する感想をお願いします．

作成要領

- A4 用紙 3-5 枚程度．表紙は不要．必要であれば，図や表を添付してよい（ページ枚数に含める）．
- 参考とした文献（web ページ含む）は必ず記すこと．（剽窃，無断転載行為が判明したら受理しない．きちんと引用するなら OK）．

提出手順

- Google Classroom の課題として提出．手書きの場合は写真撮影したものを提出．
- 提出〆切は，**2025年12月28日（日） 23:59**
- 提出ファイルの名前は，「Q 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること．（Q は Quantum の頭文字でレポート区別するためのもの，学科は大日/短生など2文字で，XXXXXXX は学籍番号，○○○○は氏名）とすること．ファイル名には空白を入れず，学籍番号は半角で．一括ダウンロードして読むため，このファイル名をお願いします．
- ファイル内の初めにも，タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること．
- pdf ファイルが望ましいが，word ファイルでもよい．

前回のミニッツペーパーから

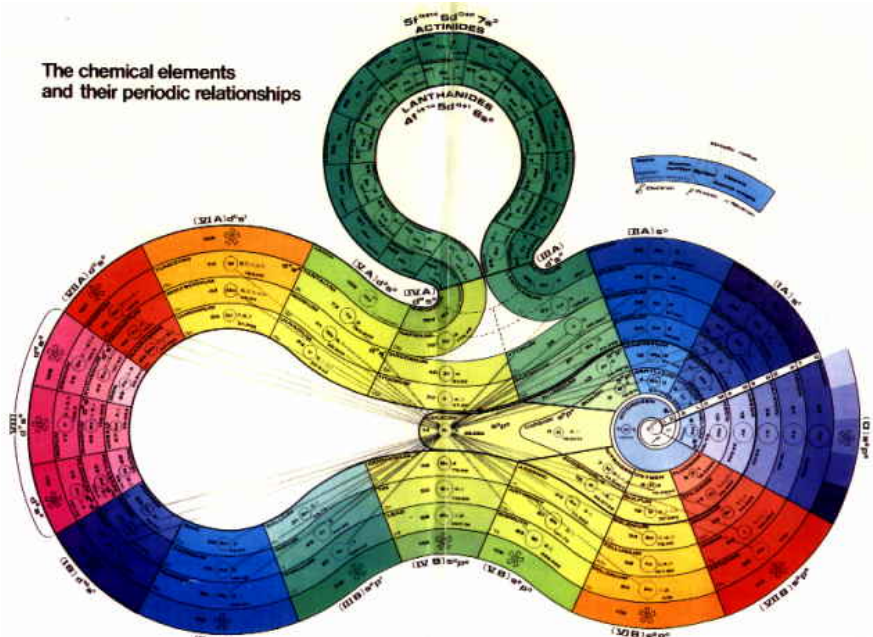
周期表 (periodic table)

教科書 後ろ見開き

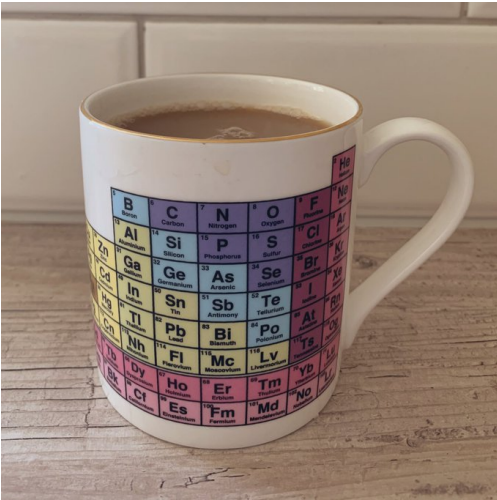
Period	1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIIB	9 VIIIB	10 VIIIB	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1	1 H hydrogen 1.008	2 He helium 4.003																
2	3 Li lithium 6.941	4 Be beryllium 9.012																
3	11 Na sodium 22.99	12 Mg magnesium 24.31																
4	19 K potassium 39.10	20 Ca calcium 40.08	21 Sc scandium 44.96	22 Ti titanium 47.87	23 V vanadium 50.94	24 Cr chromium 52.00	25 Mn manganese 54.94	26 Fe iron 55.85	27 Co cobalt 58.93	28 Ni nickel 58.69	29 Cu copper 63.55	30 Zn zinc 65.41	31 Ga gallium 69.72	32 Ge germanium 72.64	33 As arsenic 74.92	34 Se selenium 78.96	35 Br bromine 79.90	36 Kr krypton 83.80
5	37 Rb rubidium 85.47	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.91	40 Zr zirconium 91.22	41 Nb niobium 92.91	42 Mo molybdenum 95.94	43 Tc technetium 98	44 Ru ruthenium 101.1	45 Rh rhodium 102.9	46 Pd palladium 106.4	47 Ag silver 107.9	48 Cd cadmium 112.4	49 In indium 114.8	50 Sn tin 118.7	51 Sb antimony 121.8	52 Te tellurium 127.6	53 I iodine 126.9	54 Xe xenon 131.3
6	55 Cs cesium 132.9	56 Ba barium 137.3	57-71 lanthanides (rare earth metals)	72 Hf hafnium 178.5	73 Ta tantalum 180.9	74 W tungsten 183.8	75 Re rhenium 186.2	76 Os osmium 190.2	77 Ir iridium 192.2	78 Pt platinum 195.1	79 Au gold 197.0	80 Hg mercury 200.6	81 Tl thallium 204.4	82 Pb lead 207.2	83 Bi bismuth 209.0	84 Po polonium 209	85 At astatine 210	86 Rn radon 222
7	87 Fr francium 223	88 Ra radium 226	89-103 actinides	104 Rf rutherfordium 261	105 Db dubnium 262	106 Sg seaborgium 266	107 Bh bohrium 264	108 Hs hassium 277	109 Mt meitnerium 268	110 Ds darmstadtium 281	111 Rg roentgenium 272	112 Cn copernicium 285	113 Nh nihonium 284	114 Fl flerovium 289	115 Mc moscovium 288	116 Lv livermorium 292	117 Ts tennessine 293	118 Og oganesson 294

9 3 番以降は、すべて人工合成されたもの

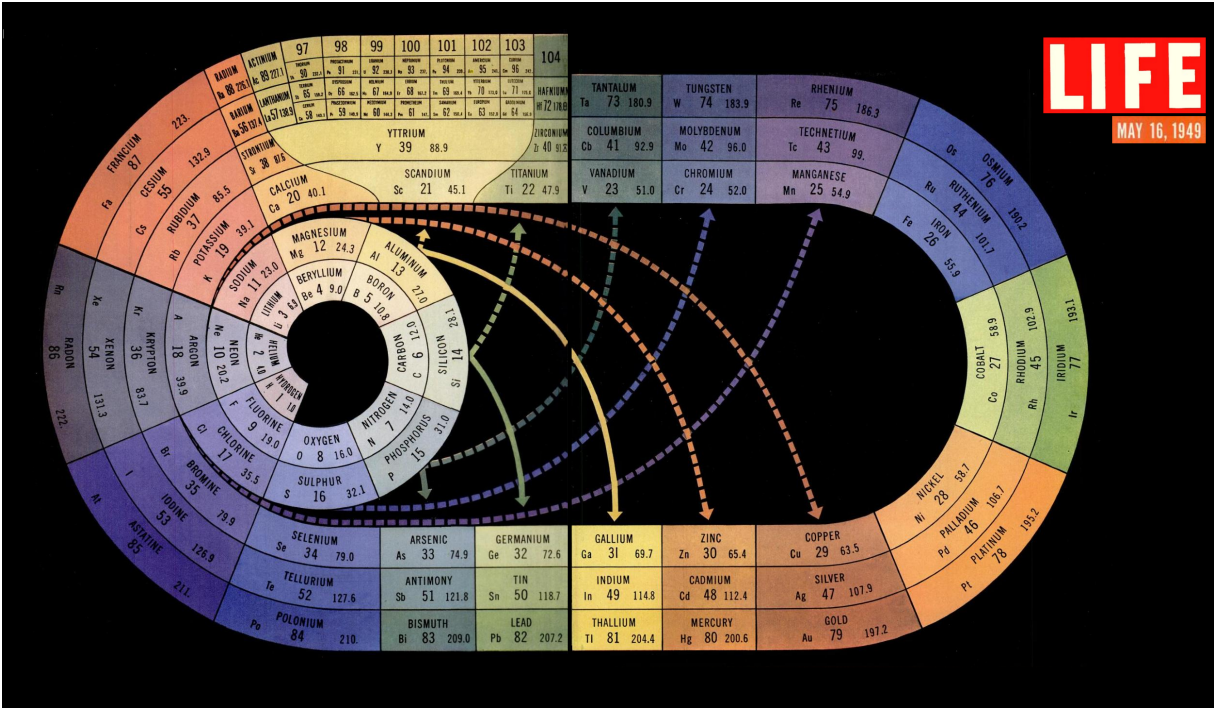
周期表 (periodic table)



<http://users.erols.com/iri/show49.html>



京都大学
オリジナルグッズ

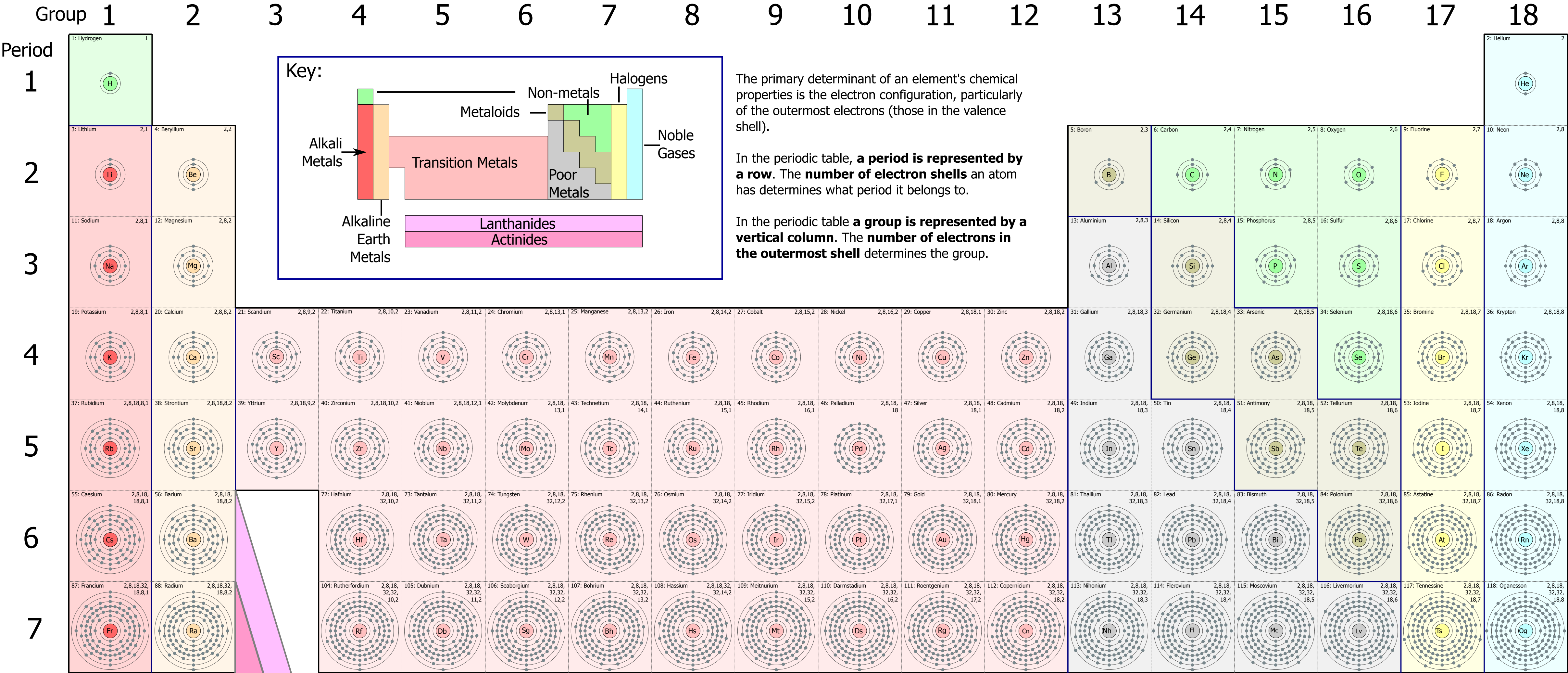


元素が 12 用になるといのは、どういうことですか？

元素

周期表 (periodic table)

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/Periodic_Table_of_Elements_showing_Electron_Shells.svg



前回のミニッツペーパーから

原子力とつきあう

東日本大震災 2011/3/11 福島第一原子力発電所溶融



原子力の扱いは本当に難しく、終わりの見えない問題だとも分かりました。

持病の定期検診で、レントゲン撮影がなかった、先生達にけろろ無防備に状態を撮影に任せてしまった、大丈夫かと思う、今日謎が解けた。子どもを待たないなど、放射線・放射性物質の恐れを感じました。

オッペンハイマー

OPPENHEIMER

映倫 R15+

15歳以上

オッペンハイマー 予告編 (2024) 1:30'

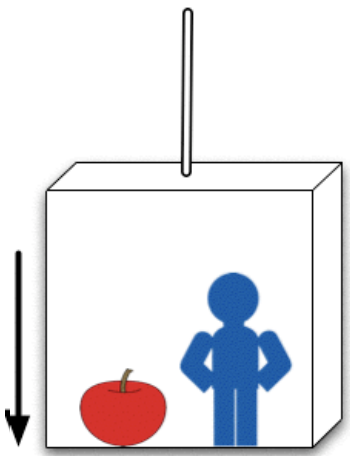
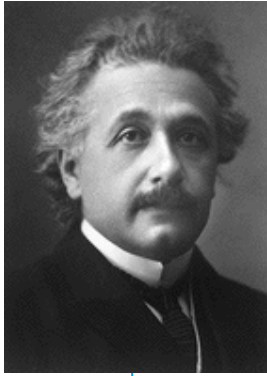
<https://www.youtube.com/watch?v=Uooutzt2IfU>

オッペンハイマーの予告編を見て、映像の迫力が緊張感がおどくて、とても面白そうだと感じた。見てみたい!!

前回のミニッツペーパーから

エレベータの思考実験

加速度の正体を考えているうちに、重力加速度の取り扱いをどうするかで悩んでいた。
エレベータのひもが切れたらどうなるだろうか？



「重力加速度は、自由落下しているエレベータ
では相殺されてしまう」
= 加速度は局所的に消去可能(等価原理)

エレベータ内では重力を消すことができるけど、...
エレベータを大きなサイズにすると消すことができない..

人生で最も幸福なひらめき

最も人生で一番幸福なひらめきを探していた。

アインシュタインは日頃からずっと考え事をしていてのだけだと思います。

理論を発見して、研究する 動機は何でしょうか

謎を解明すると、スッキリする
知りたい、という動機

遊園地などに行くと、トリックアートが体験できる的な場所があって
そこでは、空間が歪んでいて絶対にまっすぐ進めなかったり、階段を上れなかったり
しました。やはり、それも重力が関係していますか？
ちょっと体調悪くなってしまったので、人間が重力に耐えるのは難しいと思いました。

トリックアートは錯覚を利用して違和感を与えるもので、
重力とは無関係だと思います。

曲がった空間とは？

曲がった時空の幾何学=リーマン幾何学

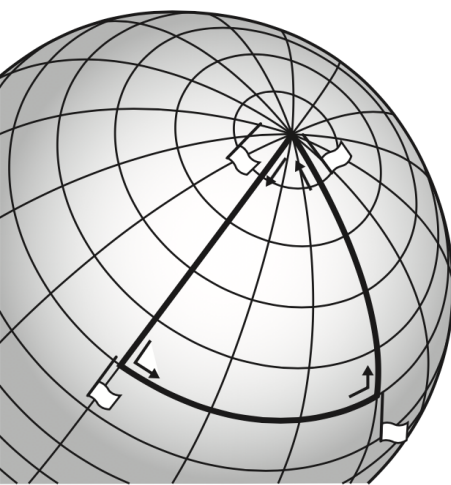


曲がった空間の数学？

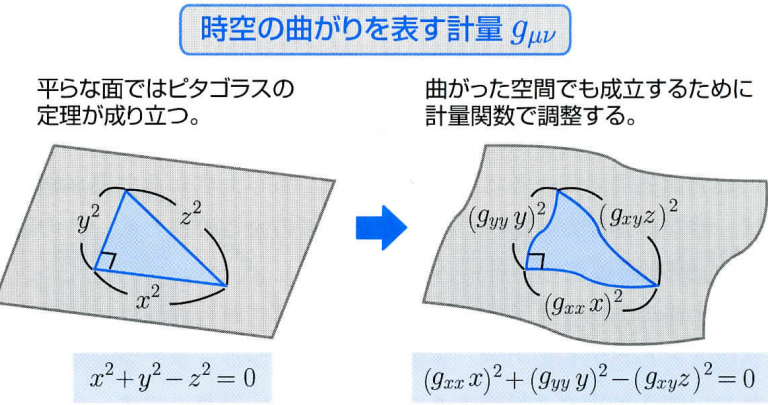
4次元距離を一般化した「計量(metric)」

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ sym. & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$



正の曲率 (地球表面)



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。

平らな時空 (flat spacetime) では、

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$



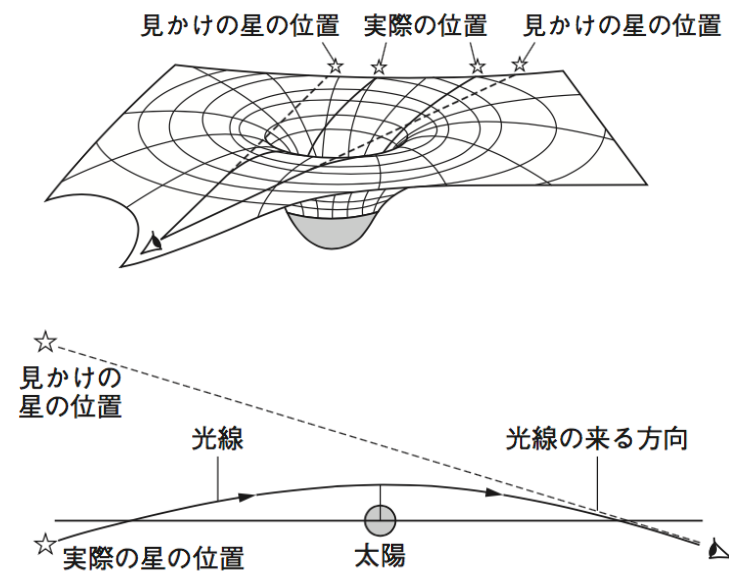
リーマン幾何学があるよ
物理学者は深入りしない
ほうがいいよ、

Marcel Grossmann

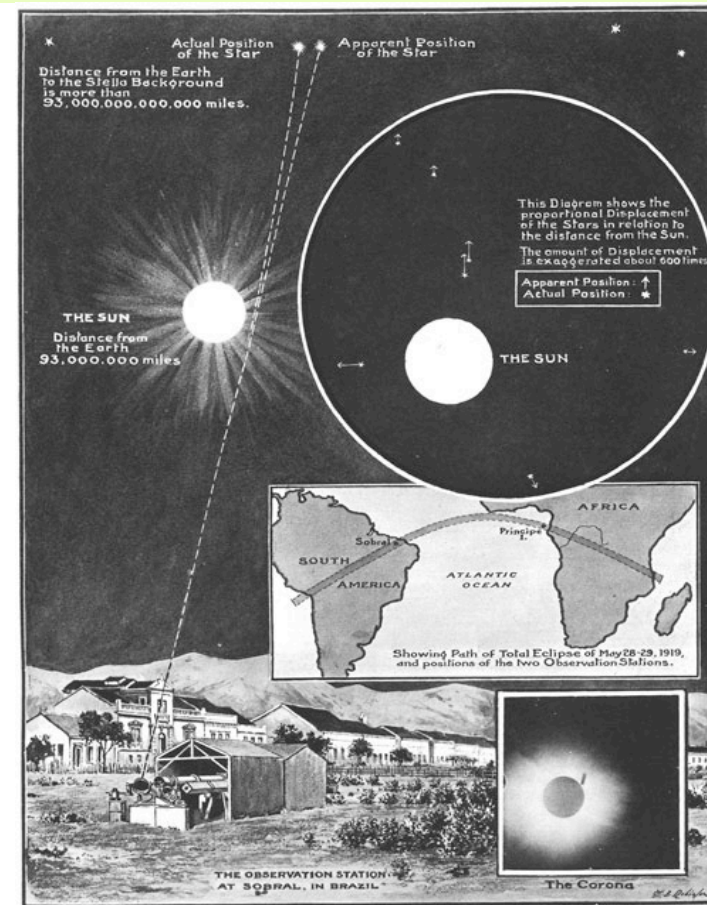
前回のミニツツパーから

重力レンズ効果 ▶▶▶ 1919年の皆既日食で確認

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



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



67

時空 $\mathcal{M}$ 上 ρ と σ の ρ 分解 $\sigma = \rho + \gamma$ が
次の曲 γ によって証明 $I + \gamma = \sigma$ かつ $\rho, \gamma \in$

小学生の頃めた 貧乏眼 食や一番おこつてニ。

2012年の金環日食を見た記憶があります。

2012年の金環日食を日食×がネ? みたいなものをつけて見たのを覚えていますが、あの×がネをつければ太陽を見ても大丈夫なのはなんでですか。

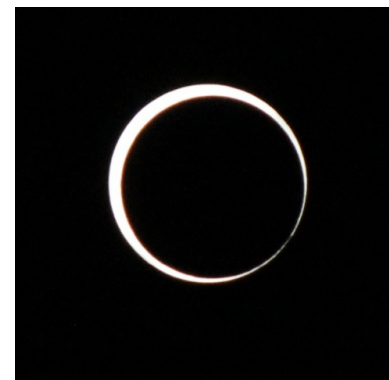
強い光と紫外線から目を守るためです。

皆既日食の写真が本当にきれいで神秘的でした。私もいつか見てみたいと思います。

2012年5月21日 金環日食



京都府木津市 槌谷則夫氏撮影



京都府向日市 真貝撮影



71



前回のミニッツペーパーから

スーパームーン、少し小さかった気がしましたが、気のせいでしょうか？

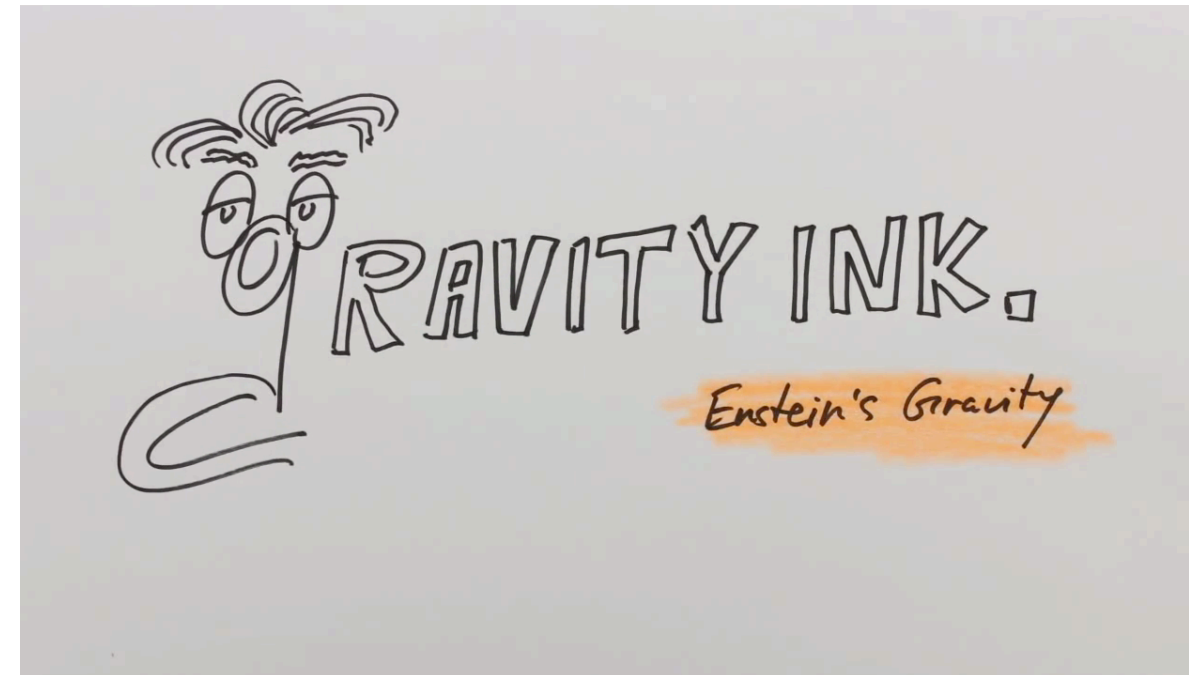
月は地平線にちかいと、建物との比較で大きく感じます。

ブレークスルーミクス実験でミクス機械は発明されていますか？

電子レンジ, GPS, インターネット とか。 いずれも軍需産業の民生転用ですが。

最近の YouTuber の人が多くなりました。

Gravity Ink. - Einstein's Gravity (Episode 1)



LISAccommunity <http://support.elisascience.org>
Hand: Pavel Gurov Voice: Heather Audley
Concept: Oliver Gerberding, Simon Barke, Heather Audley, Benjamin Knispel
http://www.youtube.com/watch?v=a_zMKF66tzo

Start on click, 3 min

これかな？

光が曲がるのは重力以外にありますか？

水面やレンズで屈折するように、異なる媒質を通ると伝播速度が変わって曲がります。

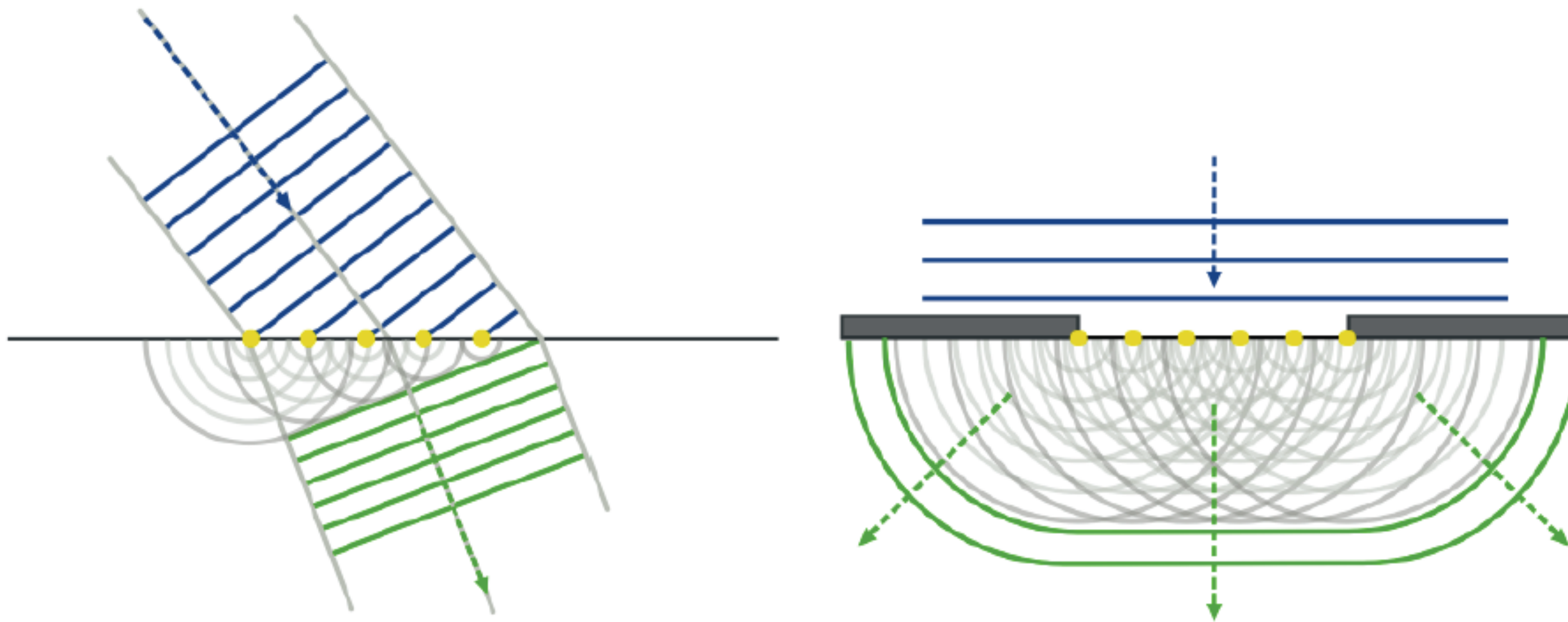
前期にもこのような授業がありましたら嬉しいです

後期だけです

屈折 と 回折

波の特徴：屈折と回折

- 波は媒質が異なるところへ進むとき、**屈折**する。(ホイヘンスの原理)
- 波は障害物の後ろにも**回折**して進む。(ホイヘンスの原理)



法則 ホイヘンスの原理

波面は無数の波源の集まりとみなすことができ、波の各点を波源として球面状に広がっていく**素元波**の重ね合わせとして、次の瞬間の波面が形成される。

Christiaan Huygens
(1629–95)



虹のしくみ

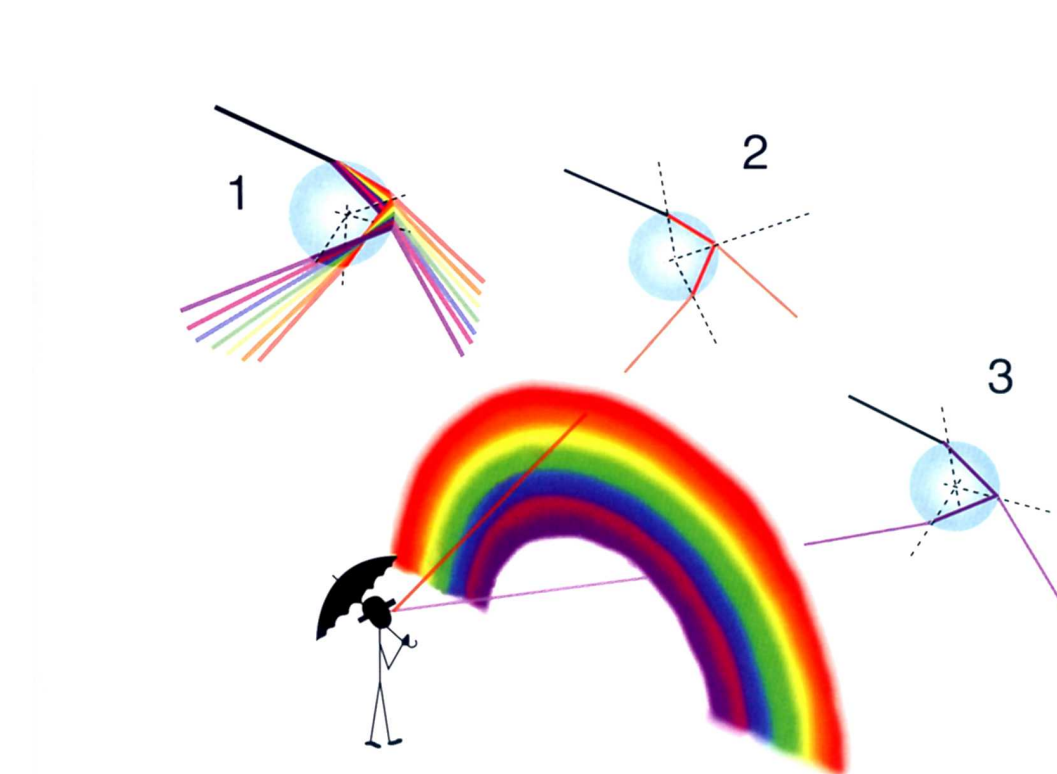
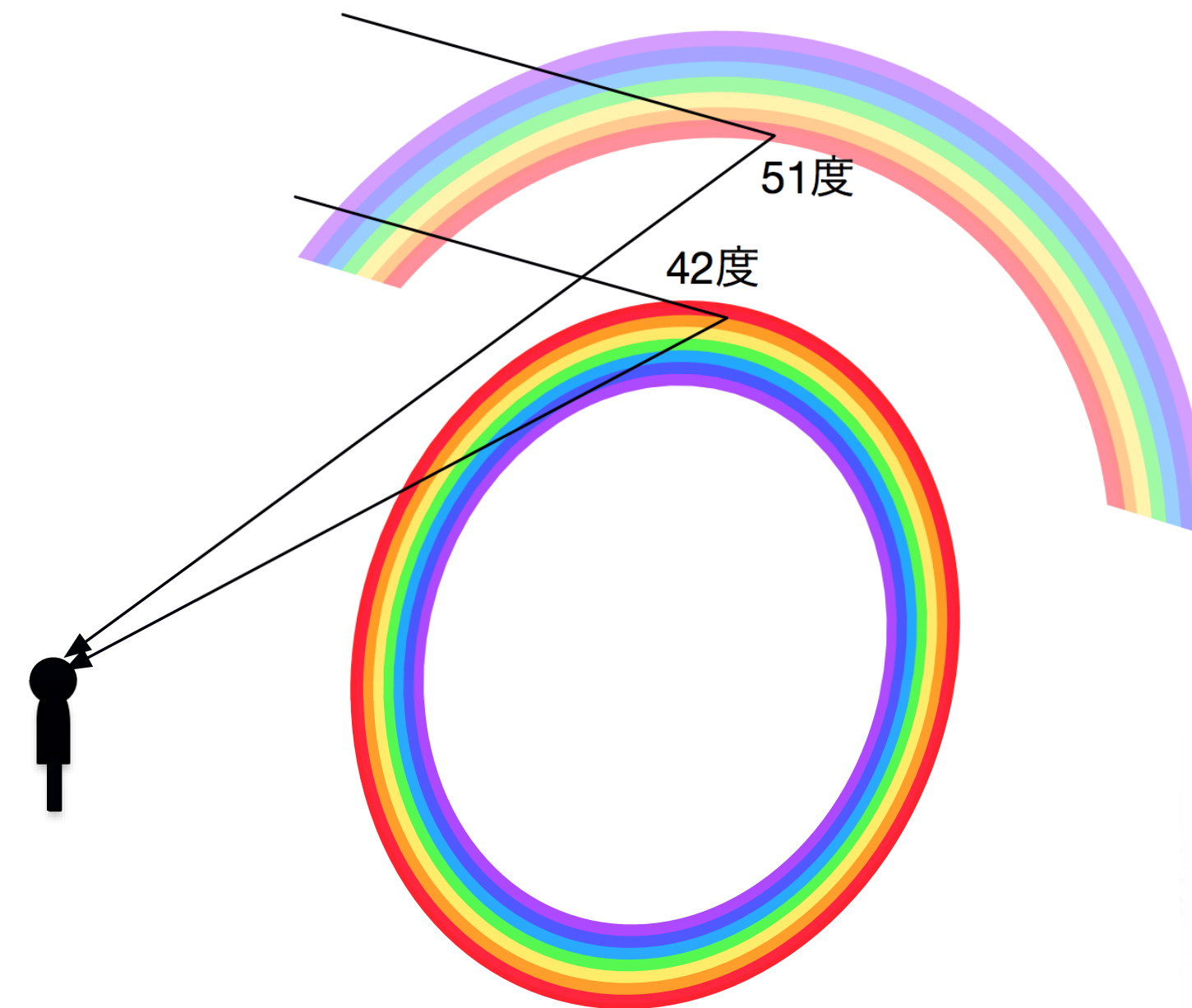
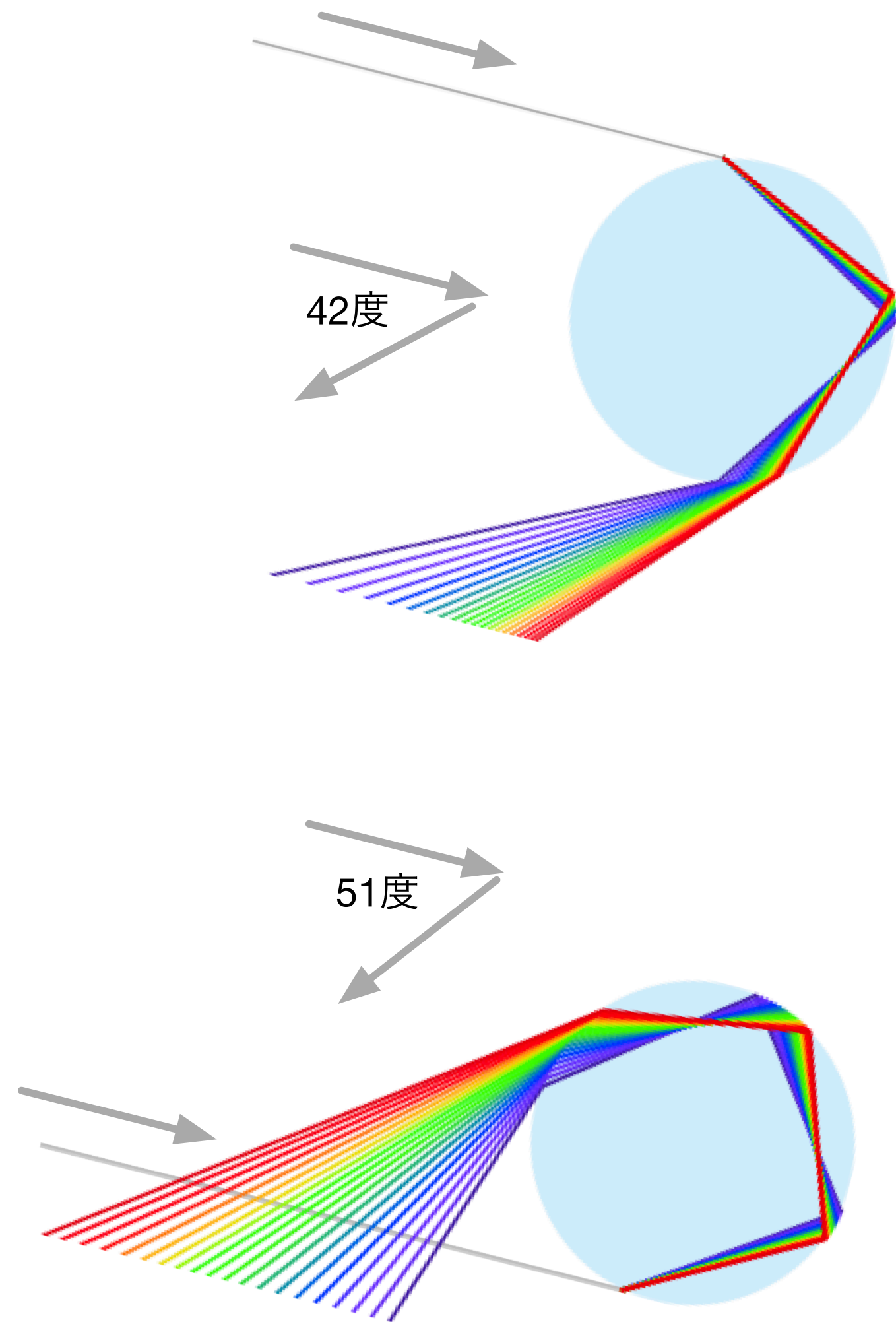


FIGURE 2.19 ► How the rainbow forms. Each water droplet, schematically represented by a sphere, is penetrated by white light, which is dispersed, then partly refracted outside the droplet, partly internally reflected.

前回のミニッツペーパーから

ブラックホールに物を吸い込むところがある人はいますか。

人類はブラックホールに近づいたことはありません。

今日の議論でやっと、少しブラックホールについて分かったような気がしました。

議論

ブラックホールは小さいイメージがあります。

ブラックホールと超重量級の星と捉えるのなら、他の星と同じように寿命は存在するのかもしれない。

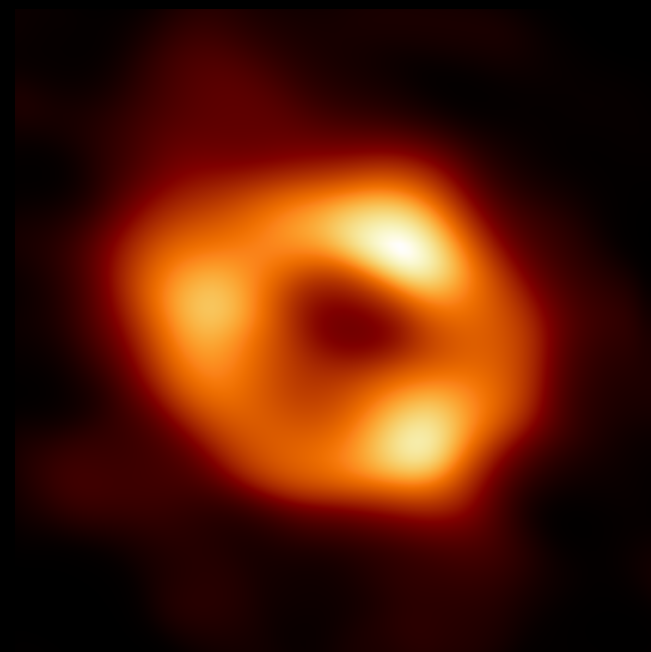
ブラックホールはモノを飲み込んで巨大化するだけと考えられています。

ブラックホールはほんとに黒いんですか？

光を出さない、という意味では黒いです。

量子論を考えると、「ブラックホールは地平線の外側で熱エネルギーを徐々に開放して、いずれは蒸発する」という考えもあります。真空から粒子生成がおきて、負のエネルギー粒子がブラックホールに吸い込まれるとブラックホールが小さくなる、という説です。

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



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

$$F = ma$$

一般相対性理論 (1915年)

- 発端：

1905年の相対性理論では、加速度を扱えなかった。

加速度の正体は何だろうか？

加速度を生じさせる**重力**とは何だろうか？

- ブレークスルー：

エレベータの自由落下で重力が消せる！

だけど、地球の大きさのエレベータでは消せない。

- **アインシュタインの結論：**

重力の正体は時空の歪みである。

エレベータの思考実験

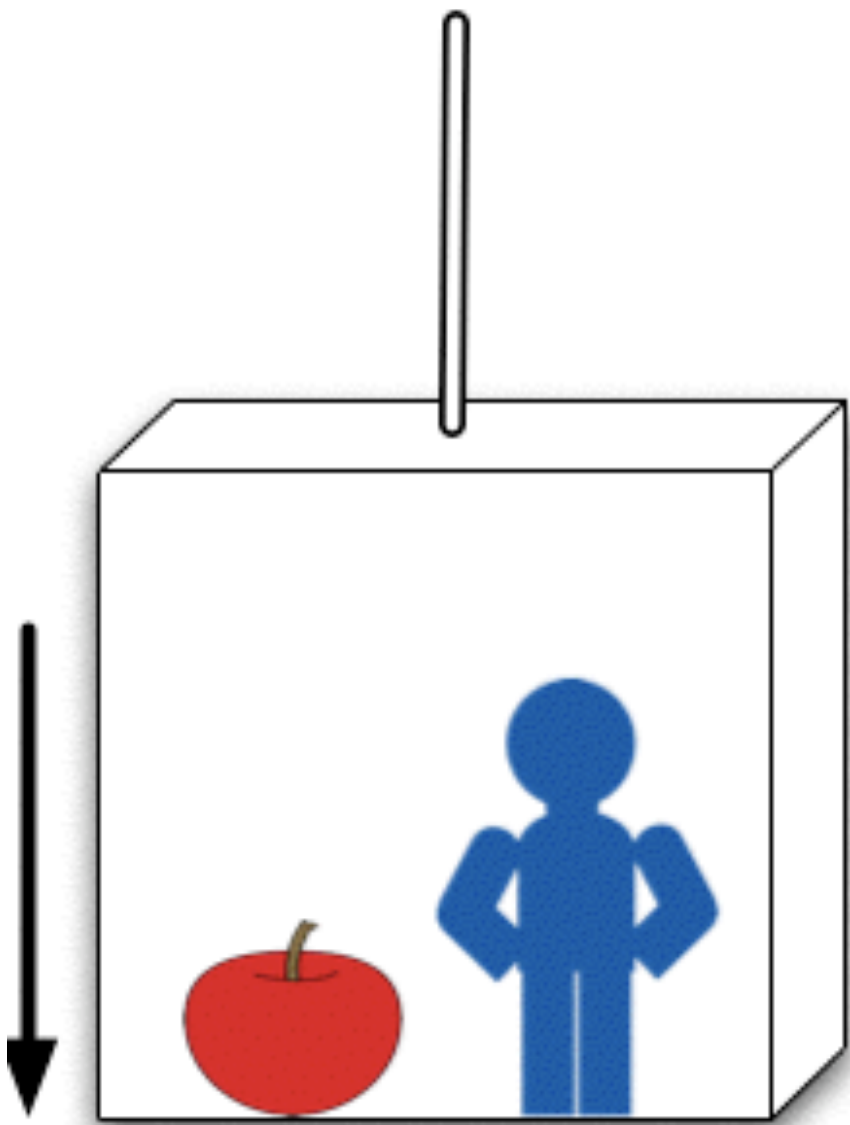
1905年の相対性原理では、等速運動しか扱っていない。
加速度運動する場合の相対性理論はどうなるだろうか。

加速度運動する代表が重力のはたらきだ。
重力の正体はなんだろうか。

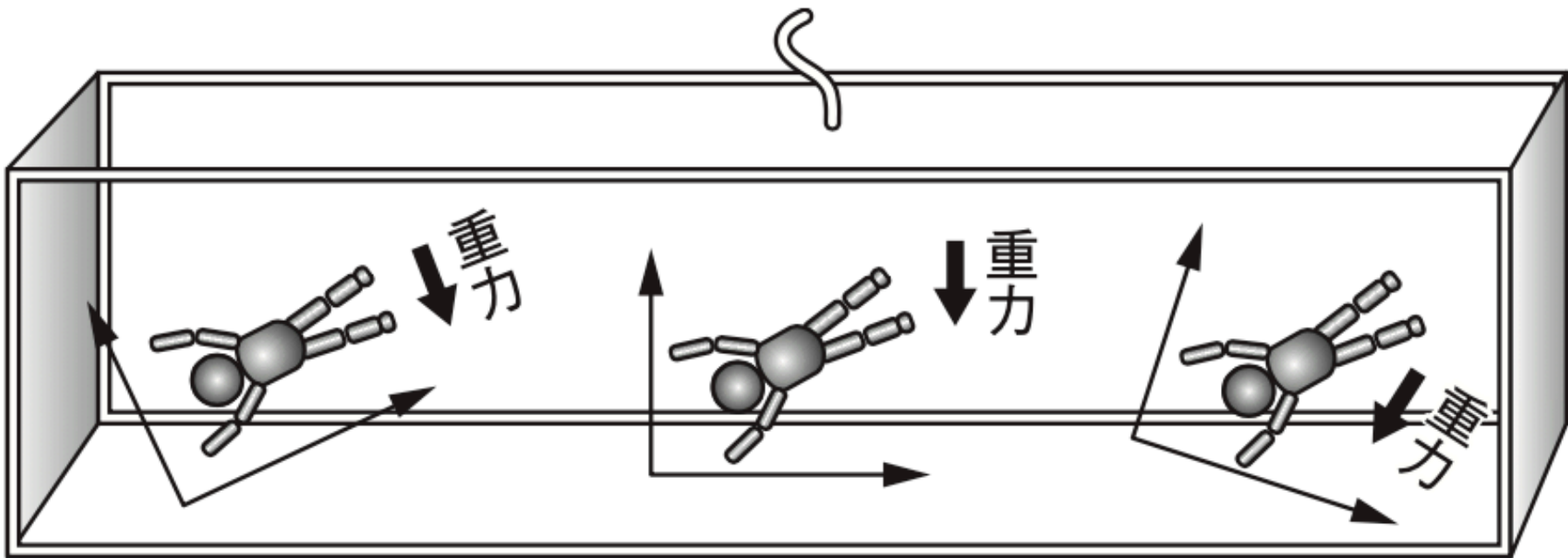
自由落下するエレベータ内では、重力がはたらいていることを感じない。
重力は局所的には消すことができるが、大域的には消せない。



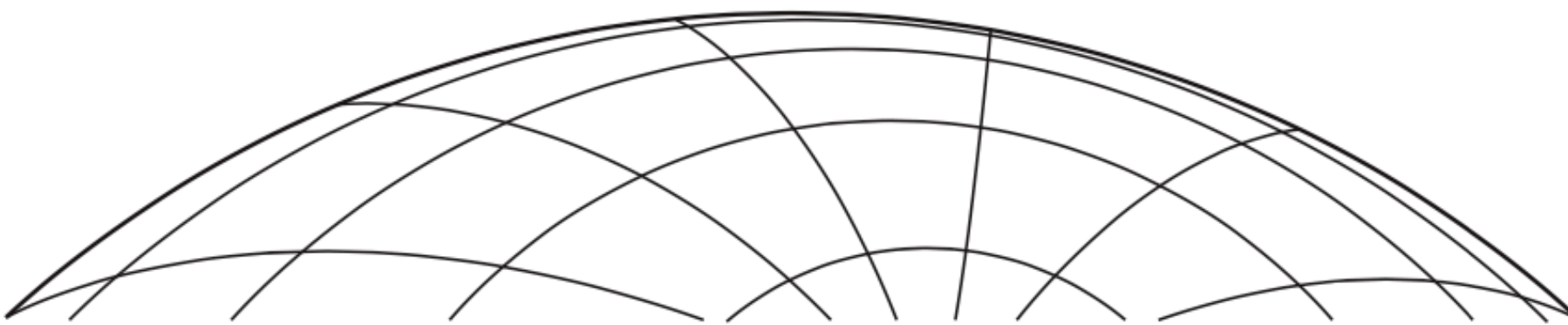
人生最大のひらめき



エレベーターの思考実験



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



重力の正体は 空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

曲がった空間とは？



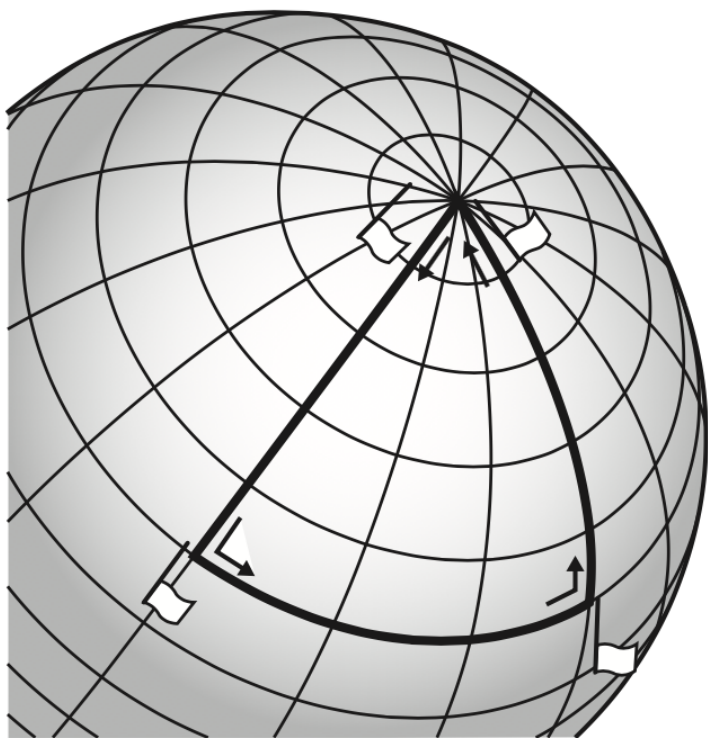
重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

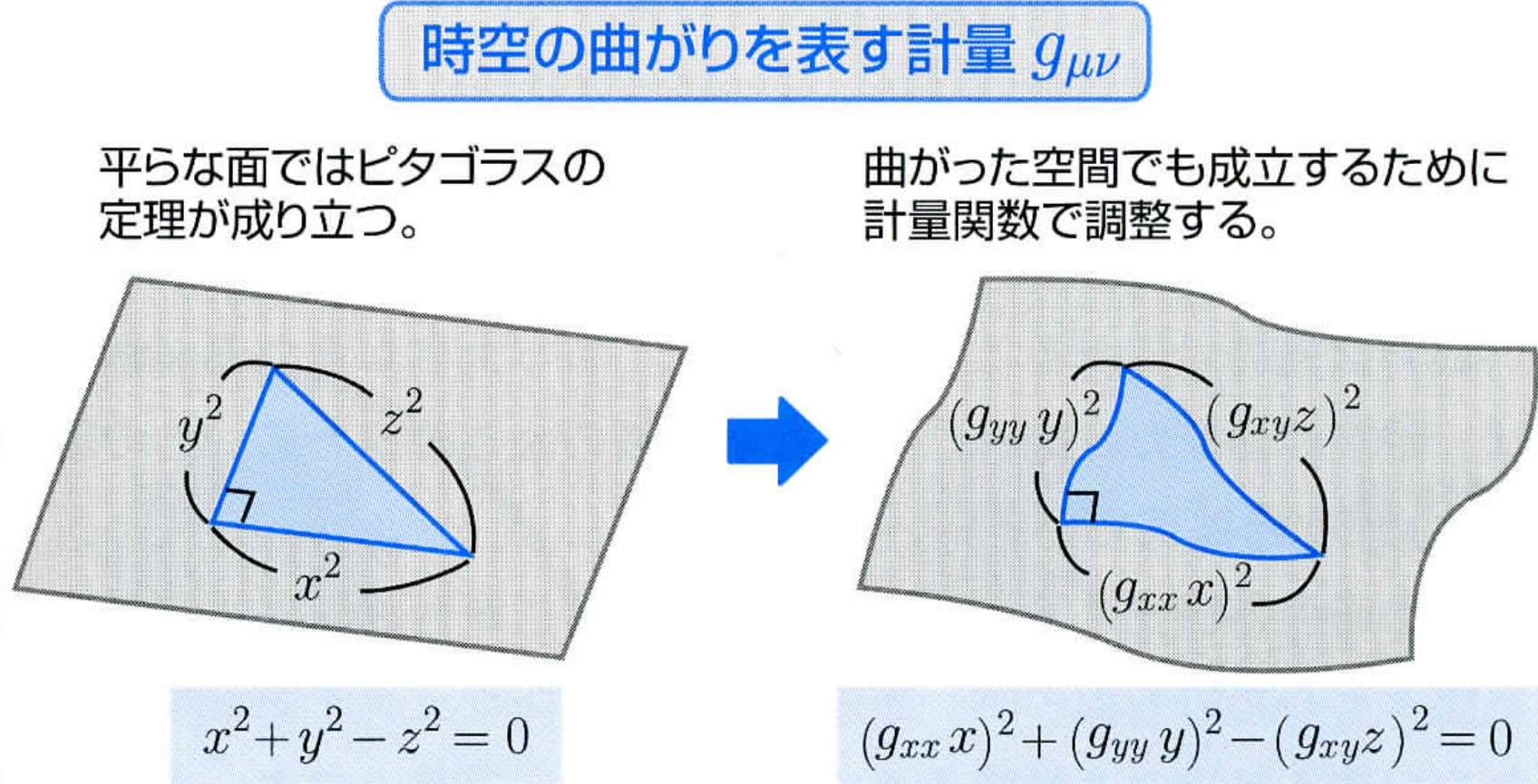


リーマン幾何学があるよ
物理学者は深入りしない
ほうがいいよ。

Marcel Grossmann



正の曲率 (地球表面)



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。

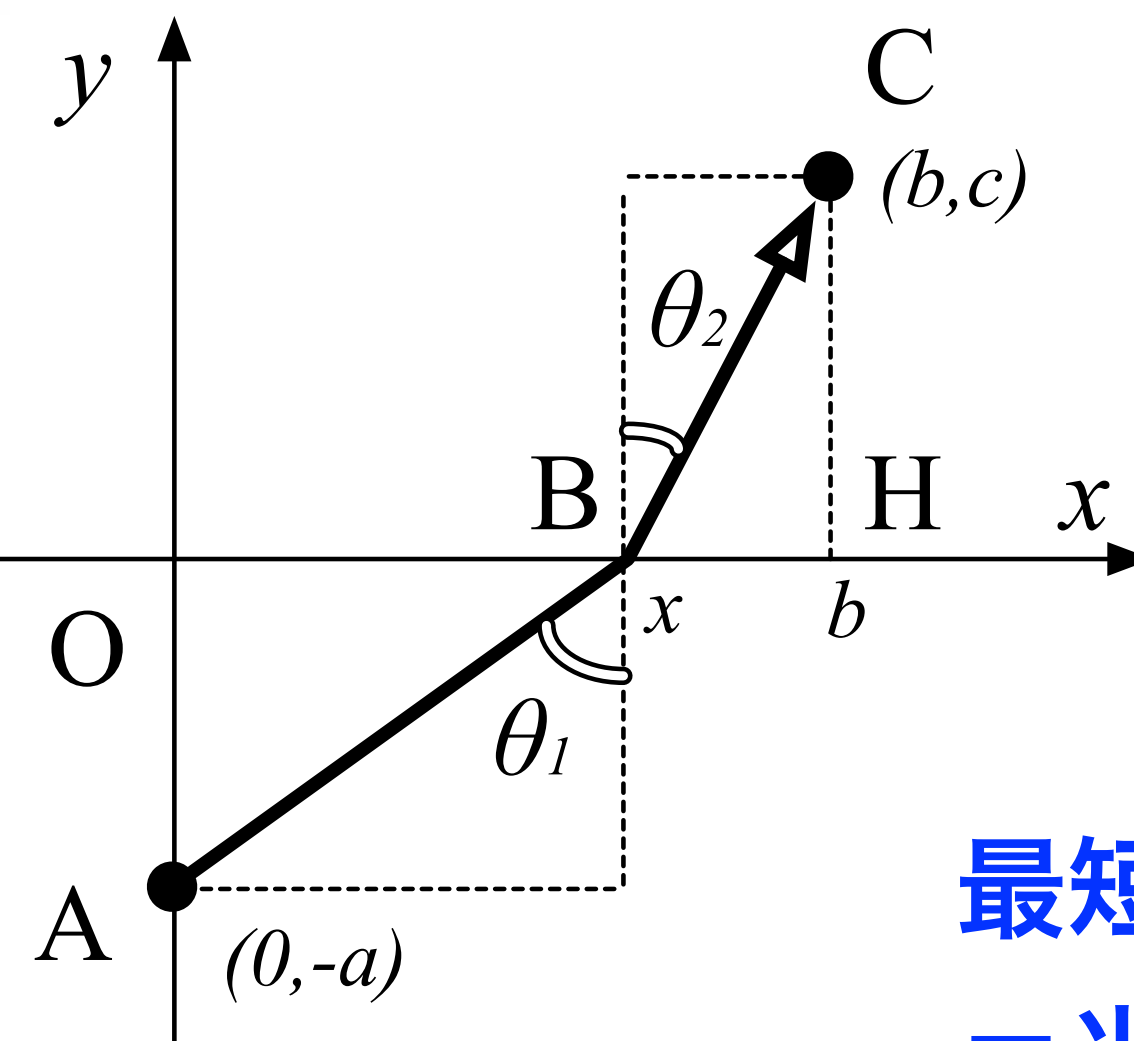
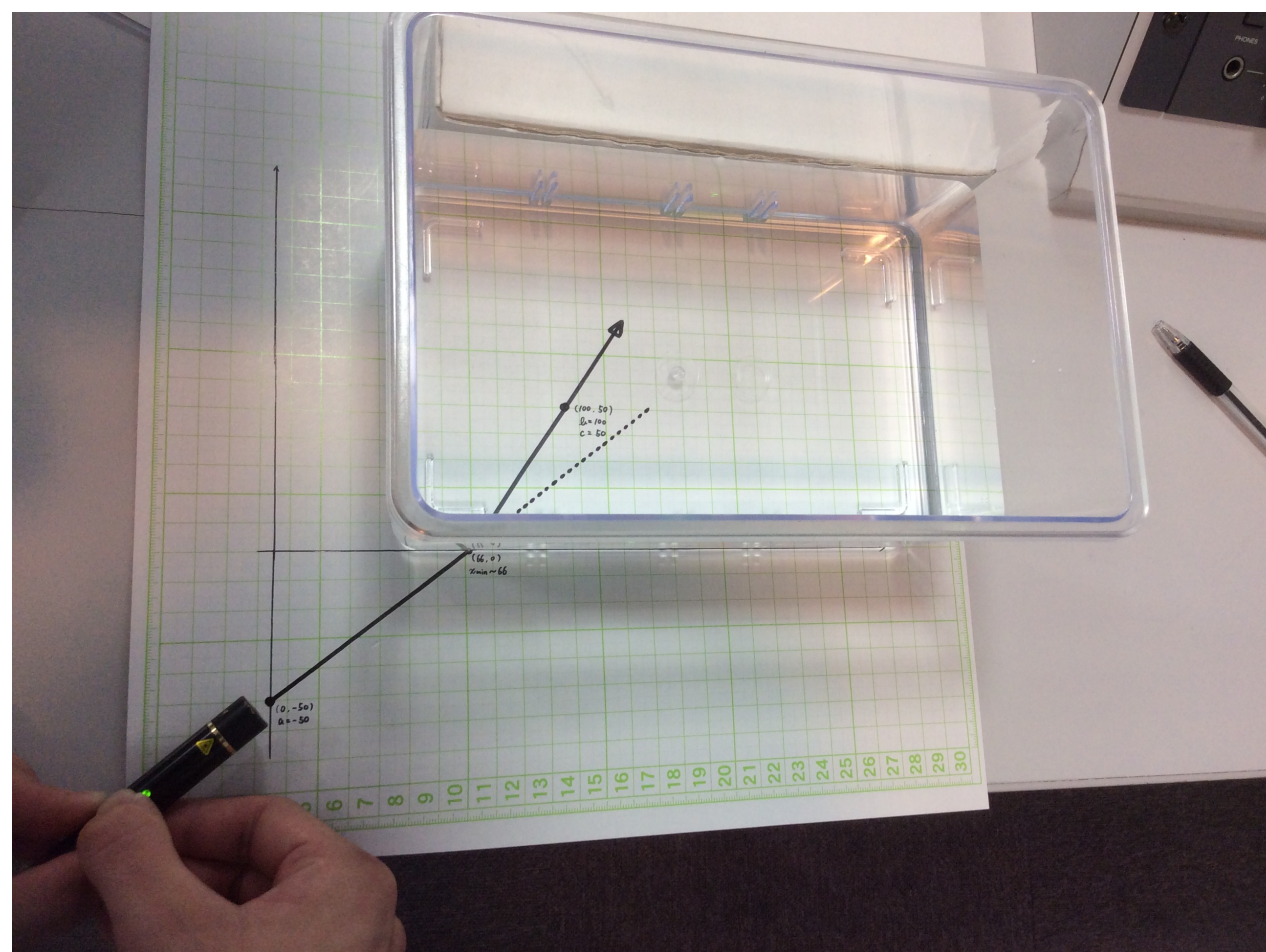
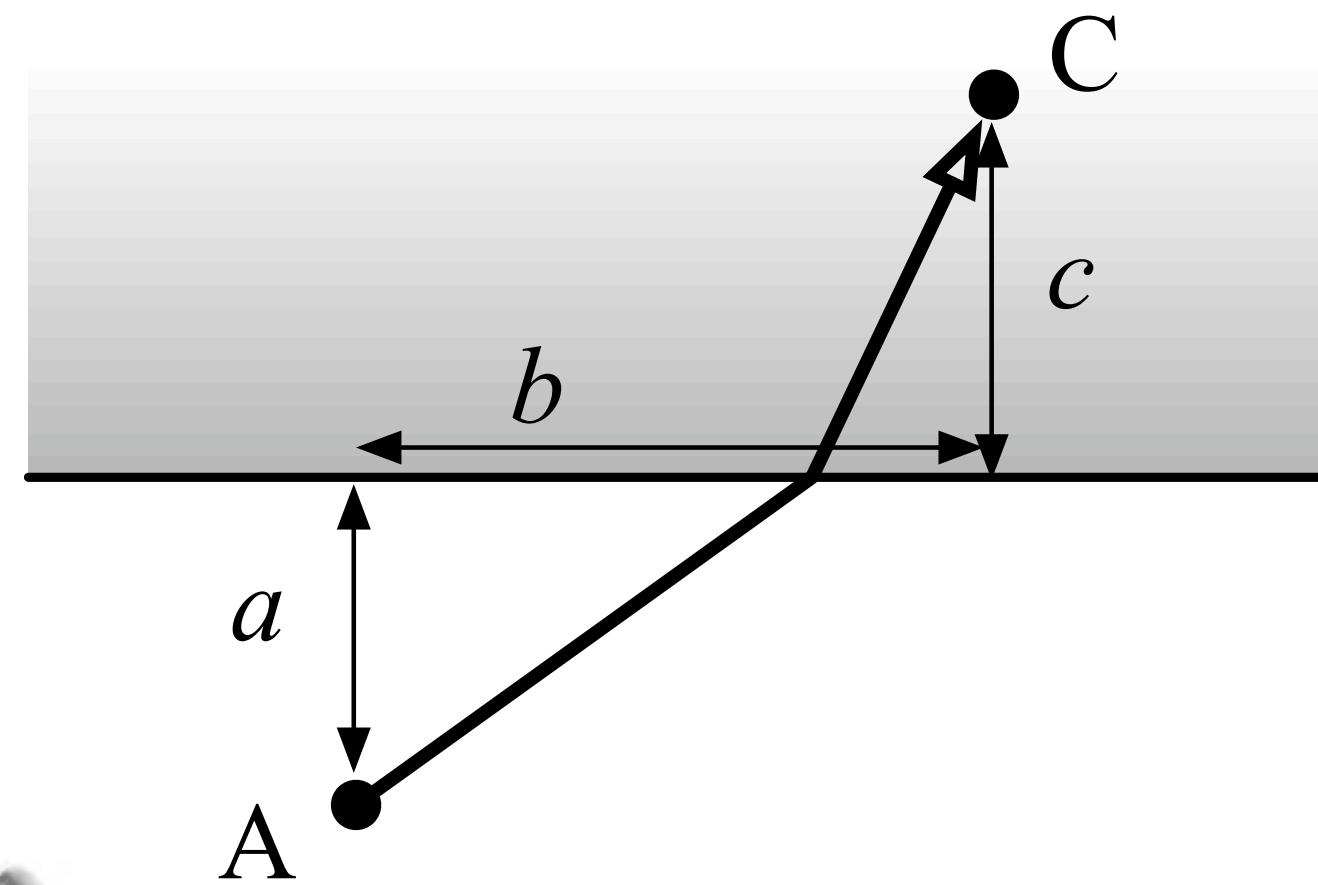
重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915 年)

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。

最小作用の原理（フェルマーの原理）

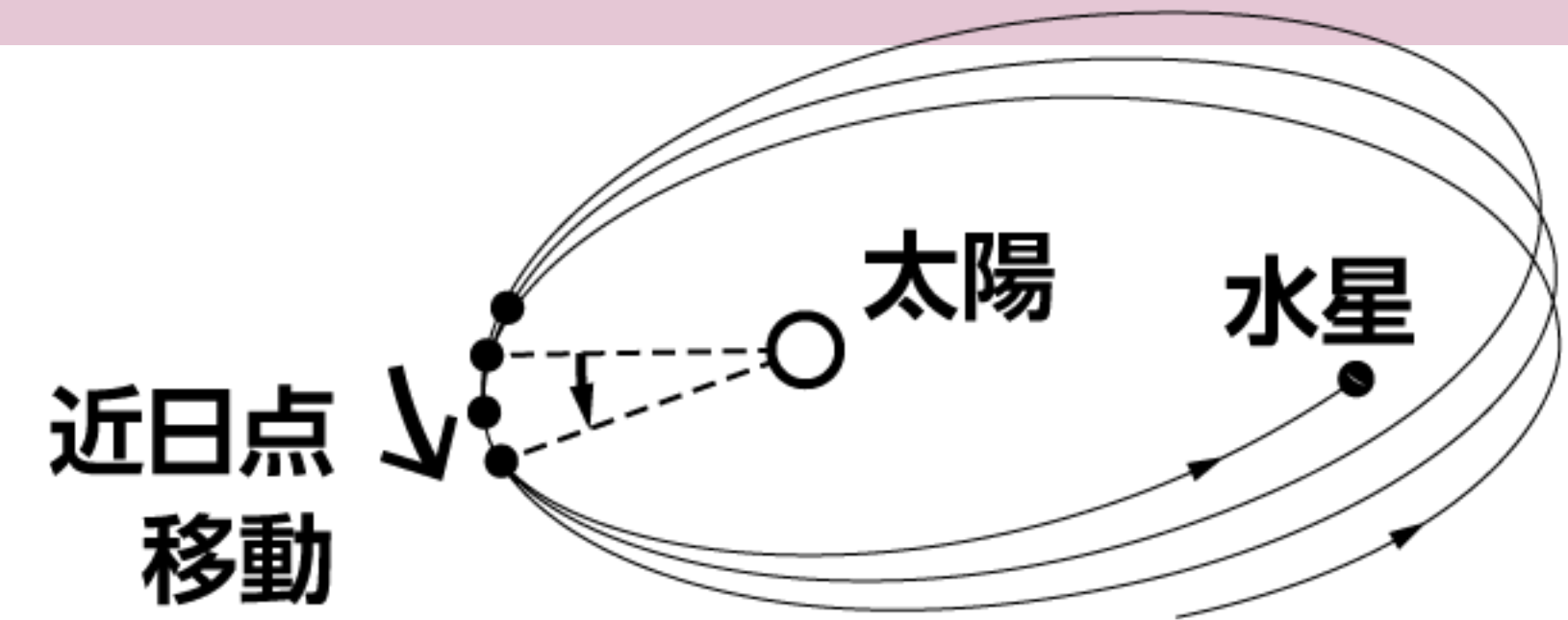


最短時間で到達する経路
= 光の経路と同じ

水星軌道の43秒角/100年 のずれ 謎が解明

水星の近日点移動の問題(ルベリエ 1854)

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



残りの43秒角は???

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

心臓の鼓動を感じた



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

一般相対性理論が予言したもの

- 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)

✗ ブラックホール特異点は簡単
 すぎる仮定をしたからだ

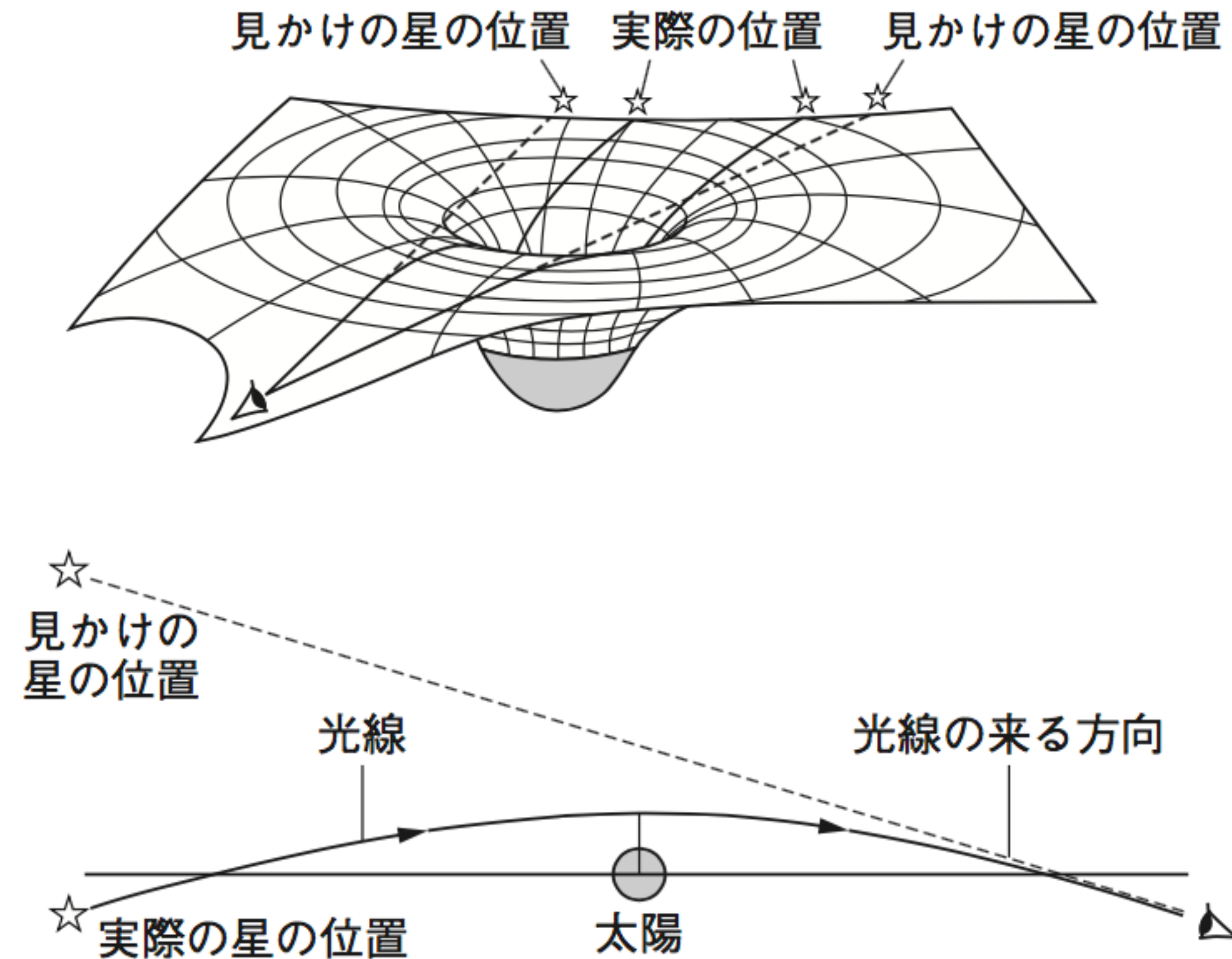
✗ 宇宙は膨張するはずない

✗ 重力波は座標系の変換で消せる

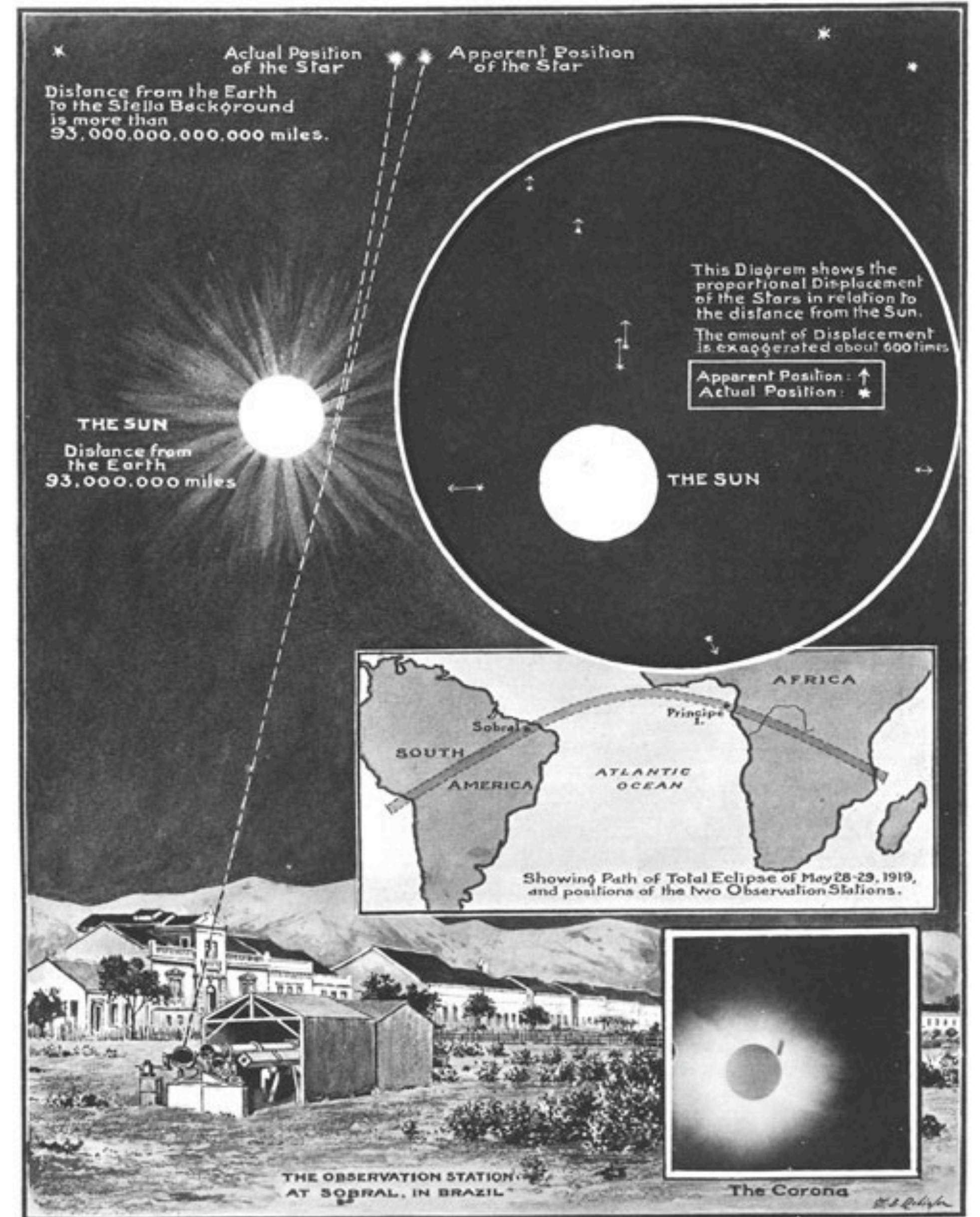
✗ 一般相対性理論は日常生活に影響することはない

1919年5月 皆既日食： 太陽の近くを通過する光は曲がる

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



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



前回のミニツツペーパーから

皆既日食の観測によって、(a)_____が確認されたことにより、
一般相対性理論の予言する(b)_____が確認された。

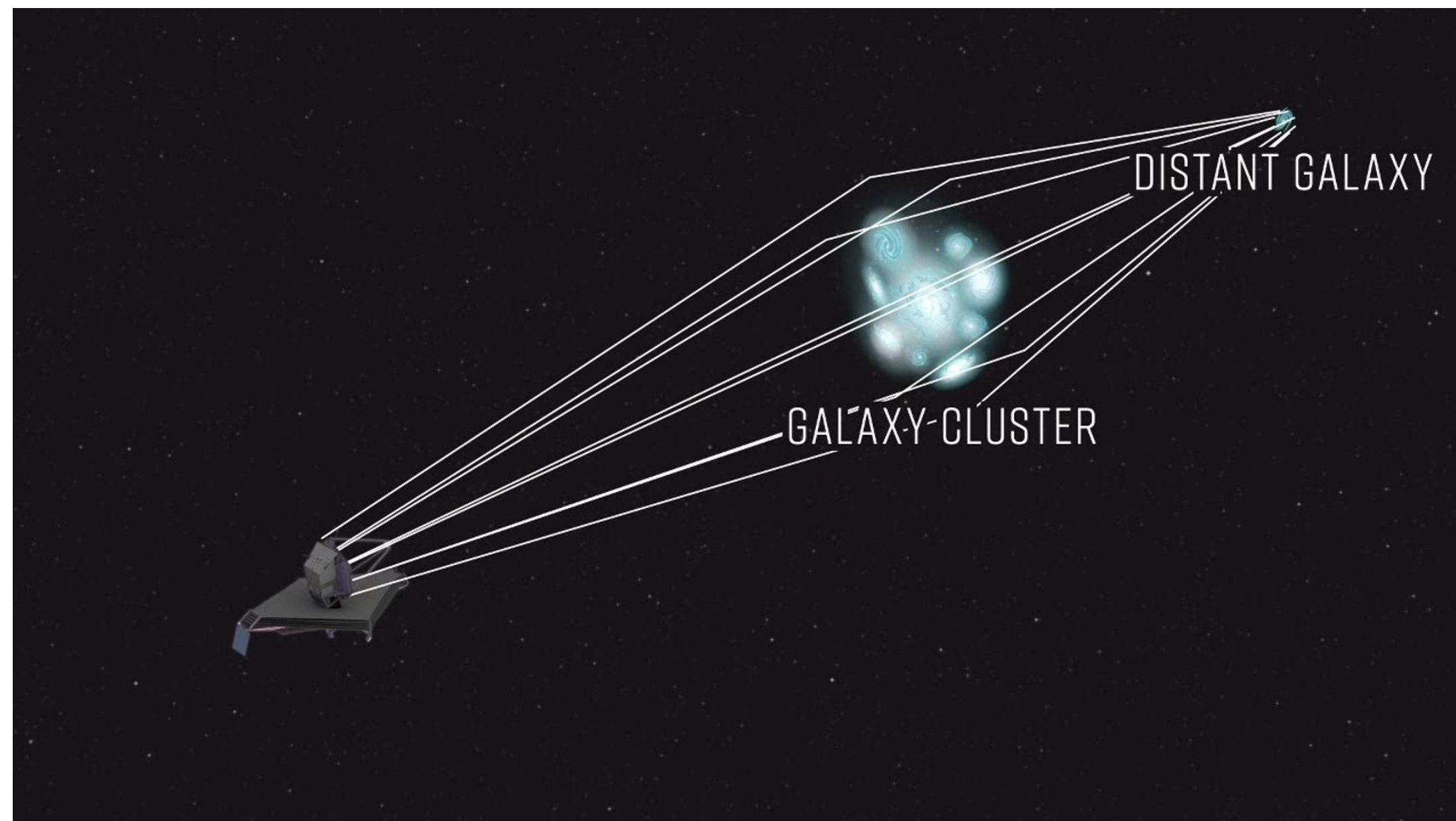
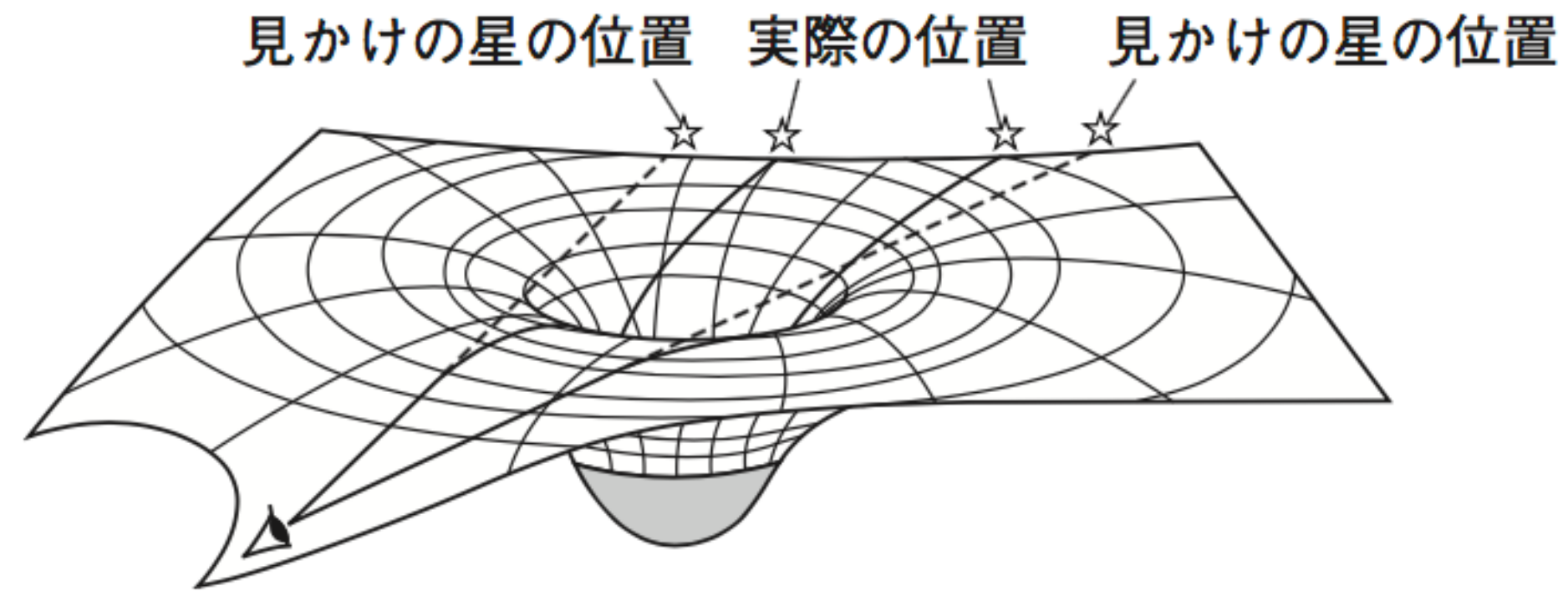
② 皆既日食の観測によって、太陽の近くを通る星の光が本来の位置とずれていることが確認されたことにより、一般相対性理論の予言する太陽の近くを通る星の光は重力レンズ効果によって曲げられることが確認された。

(a) 太陽の近くを通る星の位置が普段の位置とずれていること
(b) 重力によって歪んだ空間では光の経路も曲がること

(a) 太陽の近くを通る星の位置が通常とずれること
(b) 重い物体の周囲では空間がゆがむこと

重力レンズ効果 ▶▶▶ 銀河によるその背後の銀河からの光線湾曲

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



JWSTによる撮影, 2022年

GPS (Global Positioning System)

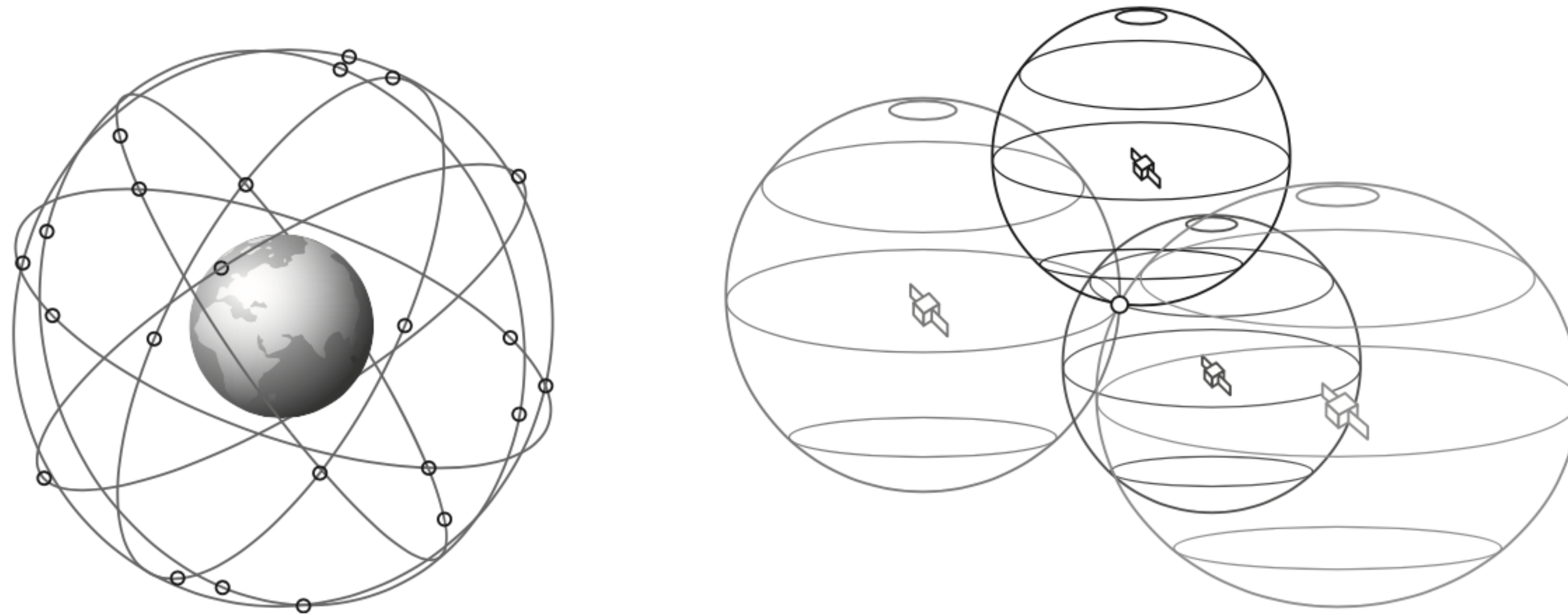


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で,

3 角測量→精度 $\pm 15\text{m}$

高速飛行の**特殊相対論効果**と

地球重力の**一般相対論効果**

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

一般相対性理論は正しい

一般相対性理論は正しいか？

- 時空のゆがみ

水星の近日点移動が説明できた
地球重力の検証では理論に反しない

- 光の曲がり

重力レンズ効果，皆既日食でも，銀河レンズでも，
GPS衛星からの電波の修正項

- 強い重力の影響

ブラックホール

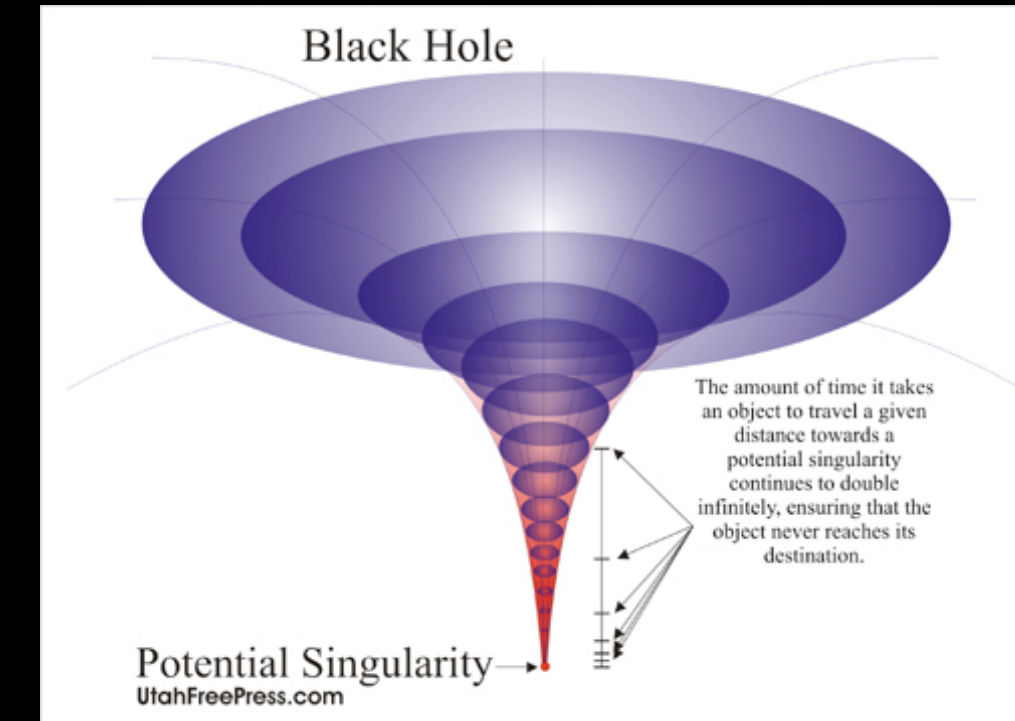
宇宙論

重力波

存在は確認，直接観測ついに，
理論どおり（ただし．．．）

2015年9月に直接観測．

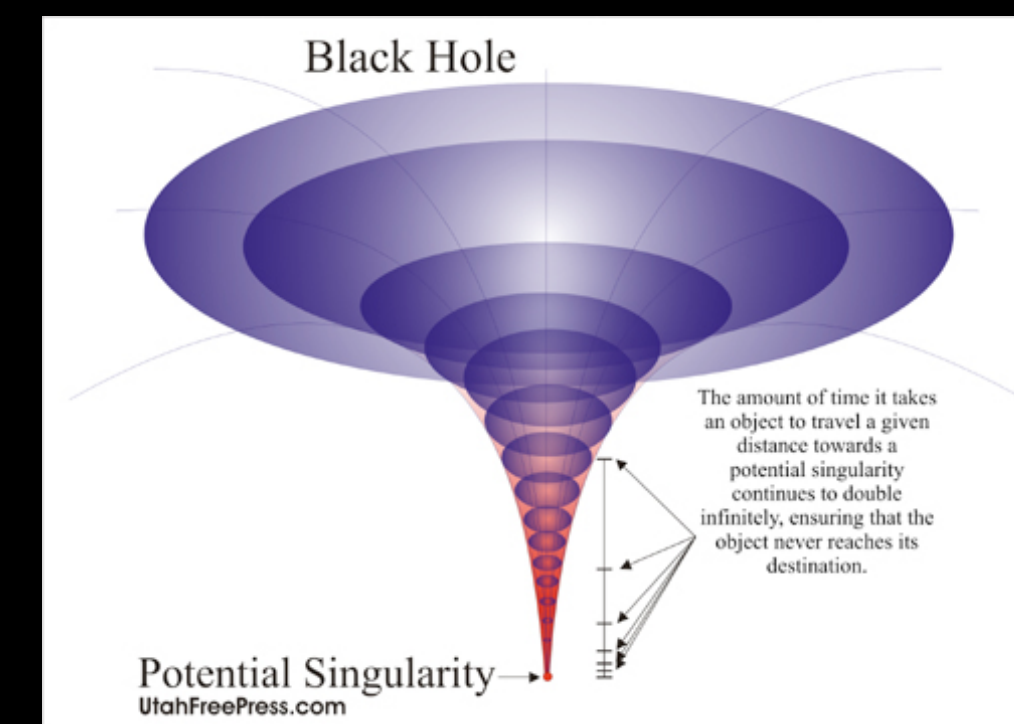
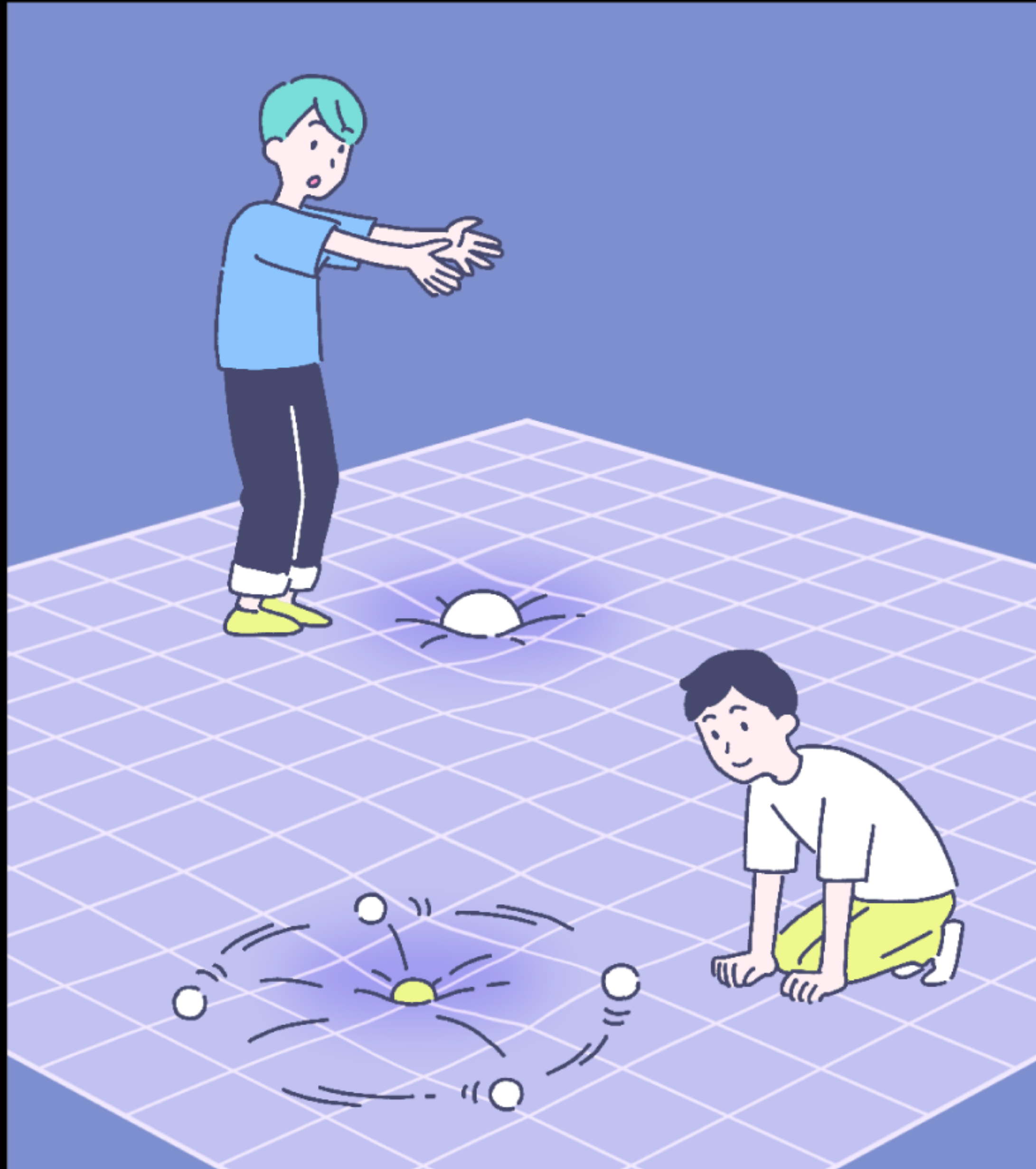
ブラックホール Black-hole



まず、方程式を解いたのは、シュバルツシルドだった。

アインシュタインは信じなかったが、
この答えは、ブラックホールを意味していた。

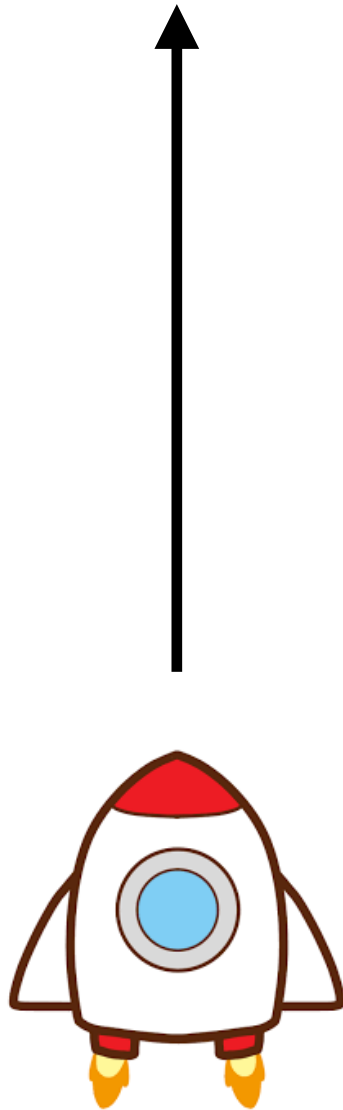
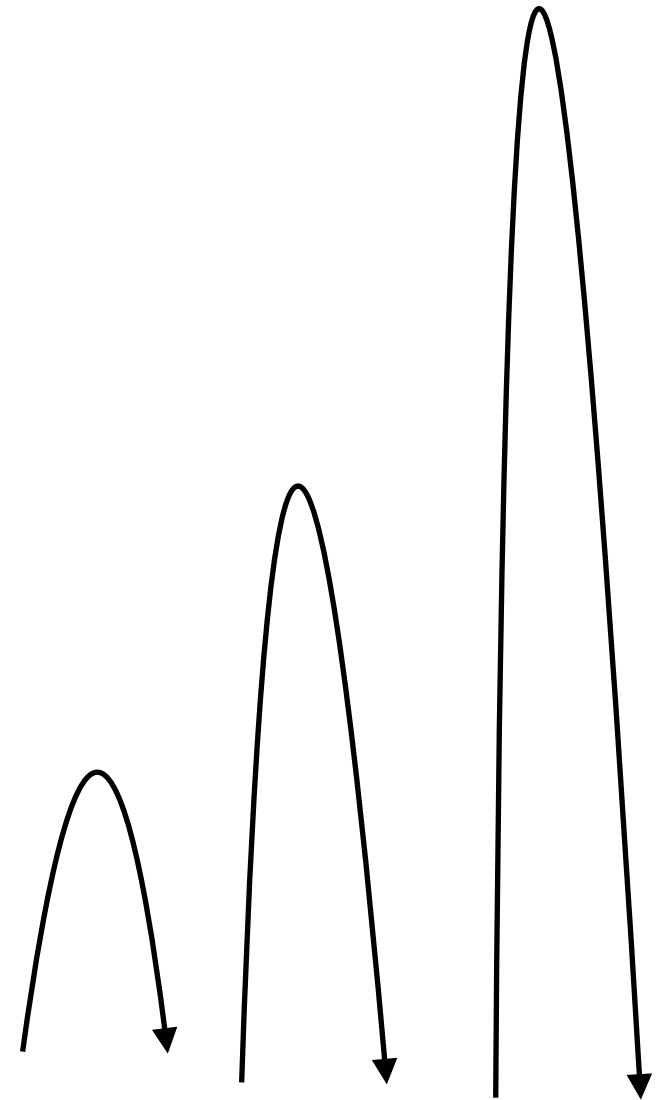
3.4 相対論の産物:(1) ブラックホールと時空特異点



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



秒速
30万 km

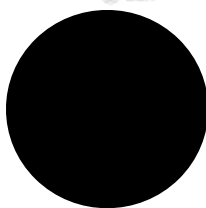
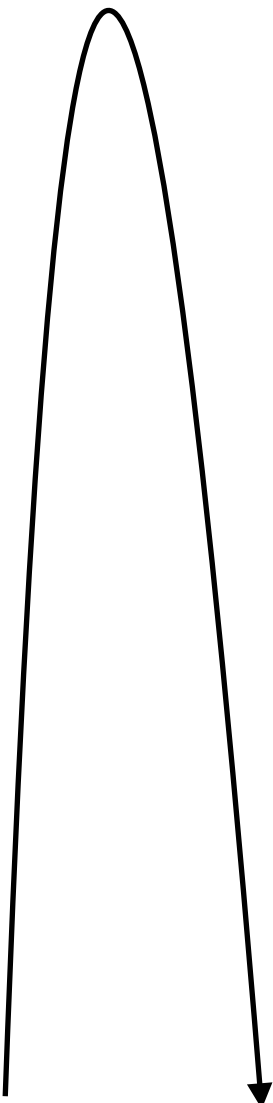


光は当然
脱出できる



地球からの脱出速度
秒速 12 km

光も
脱出できない



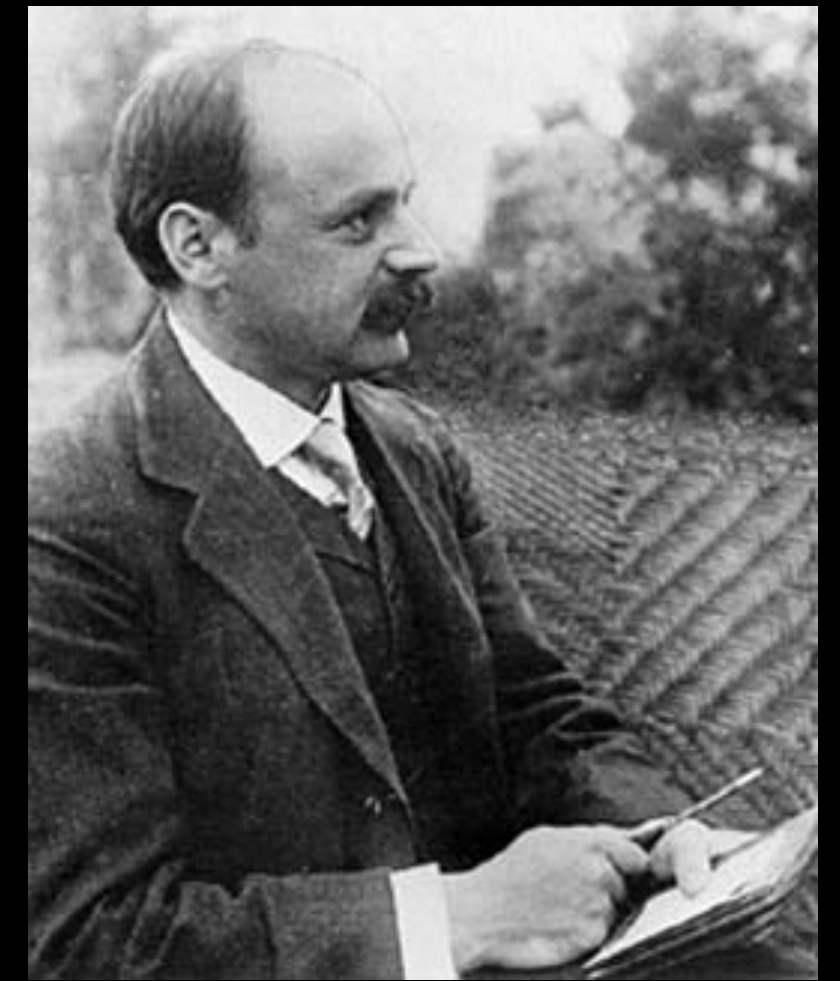
地球質量が半径9mmに
なったら、

ブラックホール

アインシュタイン方程式の解 【シュヴァルツシルド解】

Schwarzschild (1916)
球対称, 真空での方程式の厳密解

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



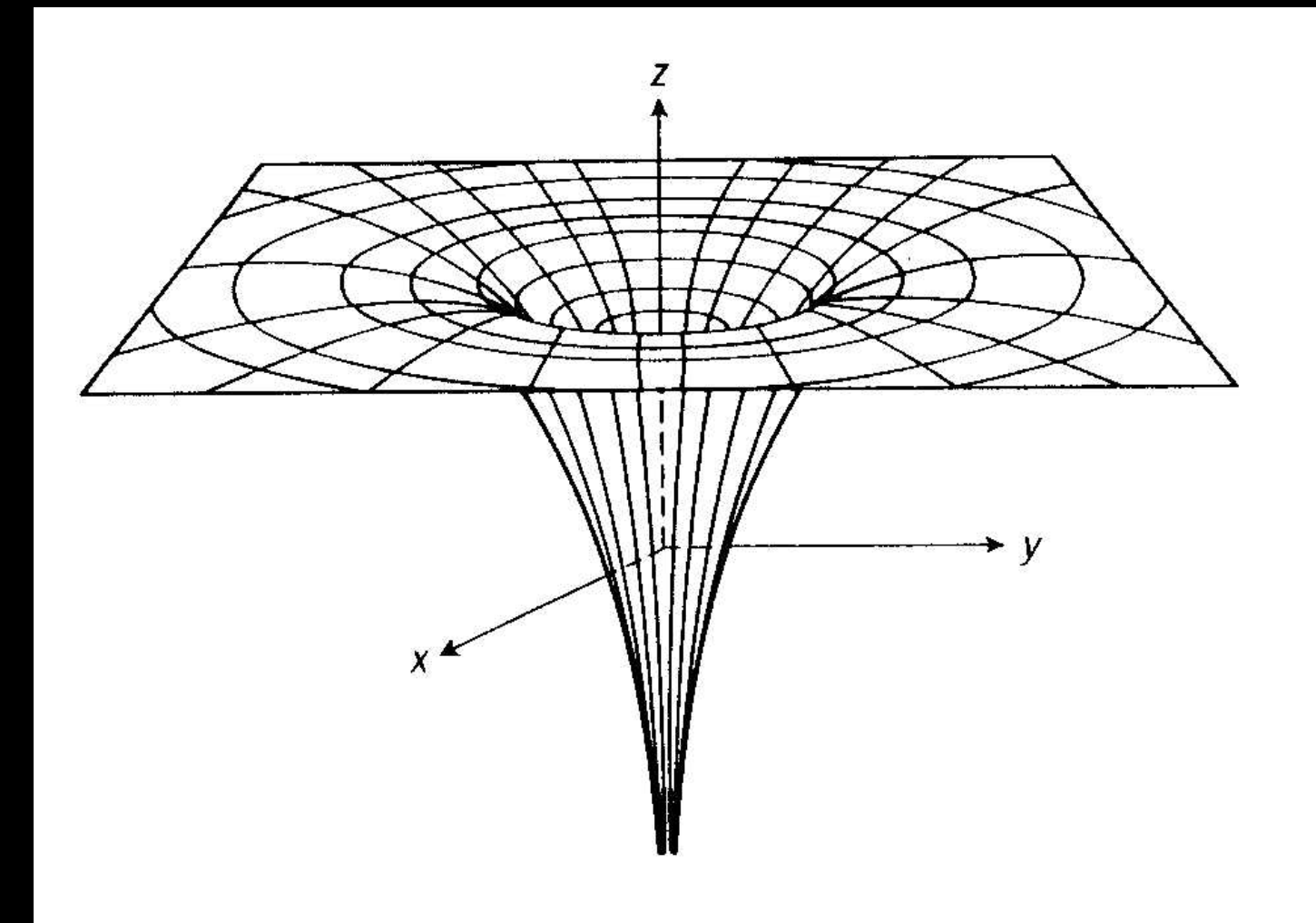
困ったことに, ……

$r=0$ で特異点

⇒ 今でも困ってる

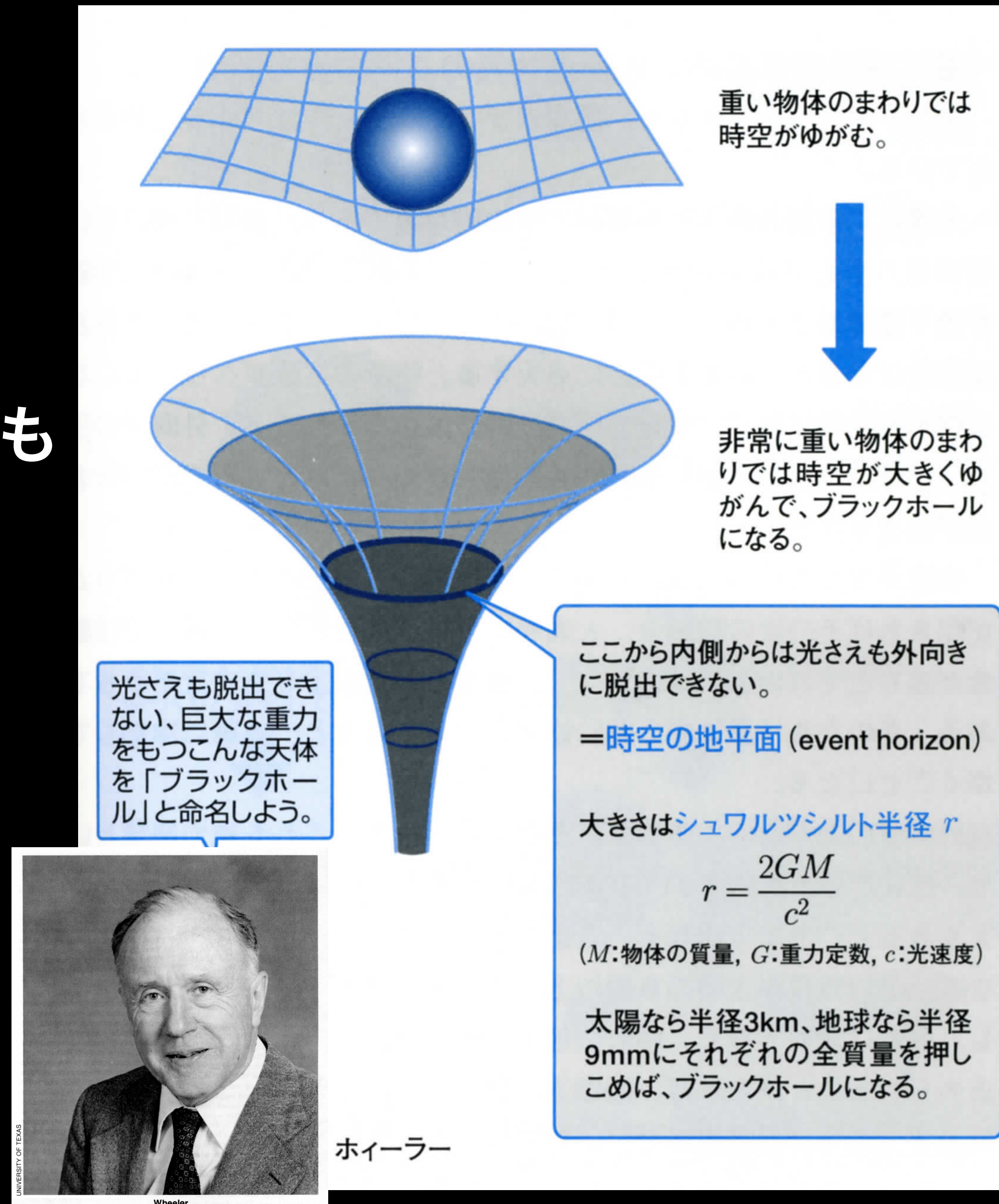
$r=2GM/c^2$ でも特異点

⇒ ブラックホールの境界



ブラックホール

ブラックホール
= 重力が強すぎて、光さえも
出られない天体
= 因果的に隔離される領域
境界 = 地平面
(ホライズン)



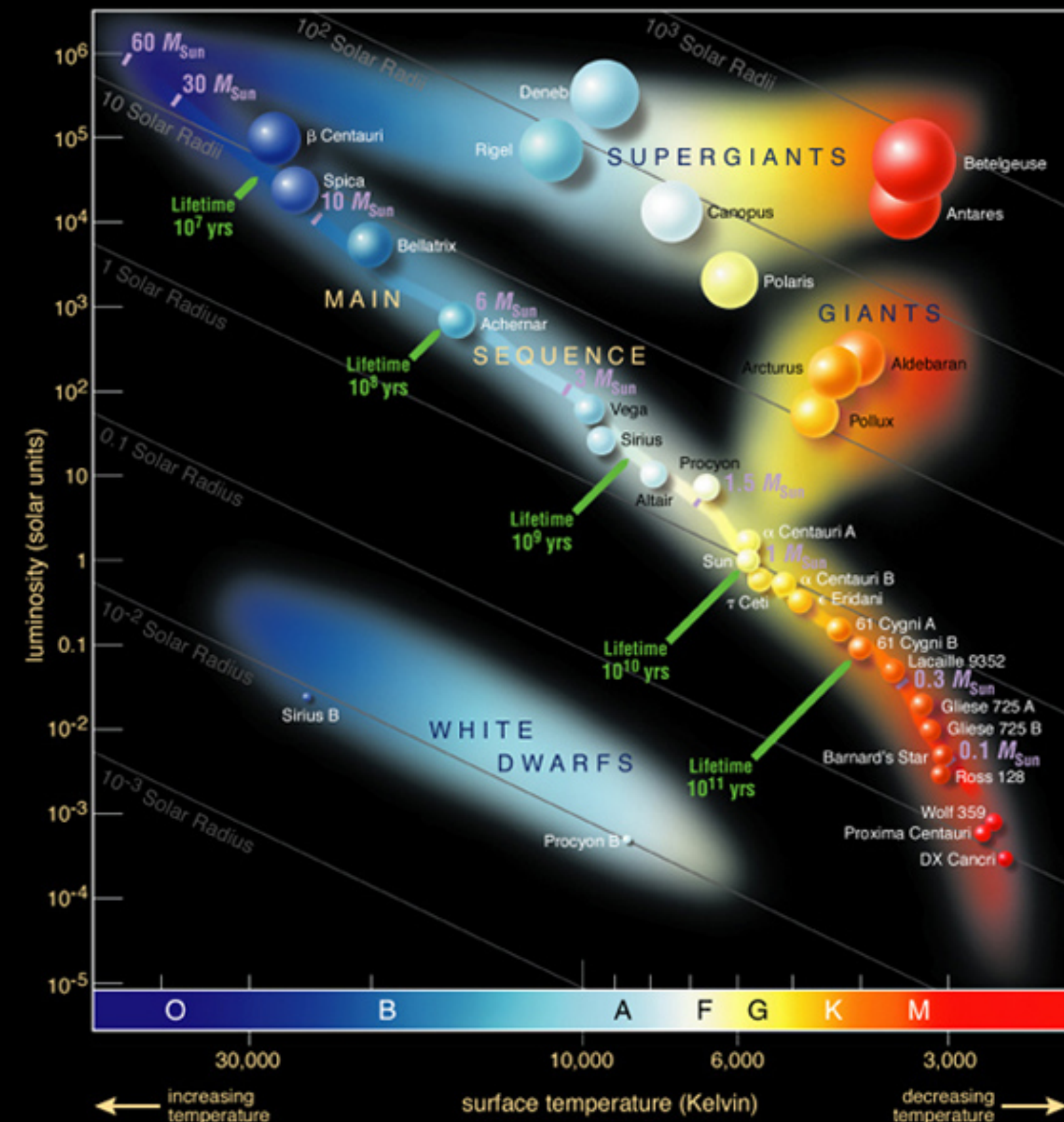
本当に、このような天体は存在するのか。

1920年代, 星の燃える理由が, 核融合による
 $E=mc^2$ の式で説明できることがわかった。

教科書 p79

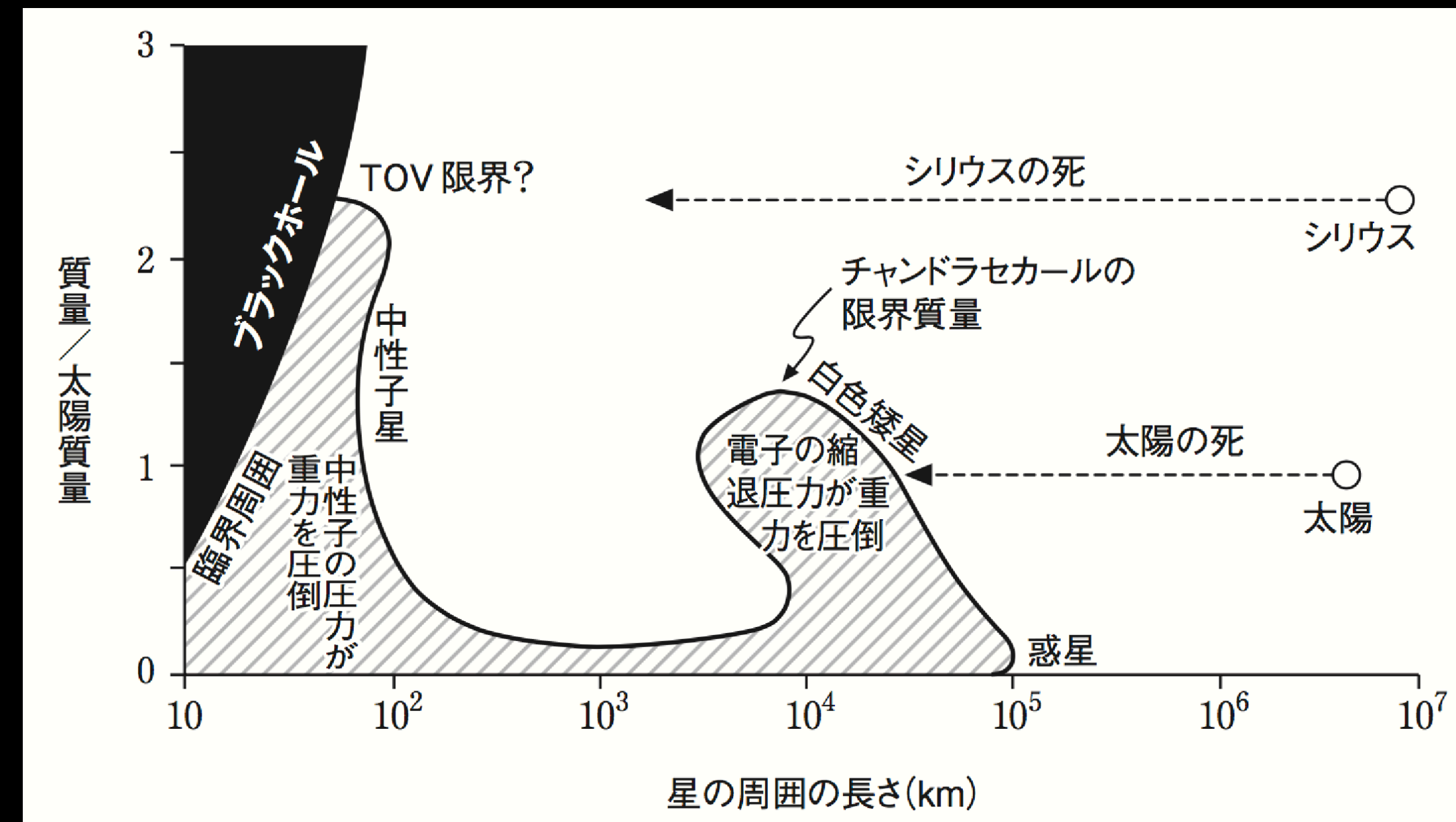
ヘルツシュプルング・ラッセル図で, 主系列な星が, 星の
 一生の経路と理解された。

暗い星「白色矮星white dwarf」
 が発見される。燃え尽きた星が
 電子の縮退圧で支えられている
 星だと考えられた。



本当に、このような天体は存在するのか。

1930年代はじめ、チャンドラセカルは、白色矮星の質量に上限（ $1.4 \times$ 太陽質量）があることを発見する。



これより重い星は永久につぶれてしまう?? 大論争がおきる

重い星が燃え尽きるとブラックホールに

星の輪廻

星(恒星)の一生を決めるのは、どれだけの質量があるか、そしてどのように燃えていくかの2つの要素だ。巨大な星は、核燃料の消費もはやく、数万年くらいの寿命しかないが、小さな星は現在の宇宙年齢の数倍も燃焼し続ける可能性がある。

褐色矮星*はよく「星のなりそこない」と呼ばれる。水素の核融合反応に点火するほどの質量を持てなかった星の残骸だからだ。これらの星は、まわりの空間に熱を放出して、ゆっくりと死んでゆき、やがて消えてゆく。巨大なガス惑星と同じなので、「ですぎた惑星」と考えてもよいかもしれない。[*訳注：矮星(dwarf)は、小さな星という意味。]

赤色矮星は小さいけれども水素の核融合を起こすことのできる星だ。低い温度で燃えるために、宇宙が今の何倍の年齢になったとしても薄暗く輝き続けることができる。宇宙にある多くの星は -- 全体のおよそ75パーセントの星は -- 赤色矮星である。

太陽型恒星(あるいは黄色矮星)は、水素とヘリウムの両方の核融合反応に点火できる十分な質量を持つ星だ。これらの星がヘリウムを失ったあとは赤色巨星になり、周囲のガス層を照らして惑星ガス雲とし、そしてやがて白色矮星となる。100億年以上の時間をかけて(もし宇宙がそれだけ長く続くならば、だが)、これらの星はゆっくりと冷却して、黒色矮星になってゆく。

超巨星や極超巨星は、星の仲間たちからみても病的に肥満している星である。太陽の10倍から数百倍の大きさの質量のものは、燃料の消費も大きく、数十万年程度の寿命である。

宇宙におけるすべての重元素の合成主の星たちは、その星のコアでひとたび鉄が合成されると、超新星として爆発する。

痩せている星は中性子星やパルサーとなって生き延びるが、肥満している星は、自分の巨大な体重で押しつぶされてブラックホールに変貌する。

図にした星の大きさは正しいものではない。例えば、太陽の20倍の質量をもつ超巨星は、太陽の75倍の大きさになる。

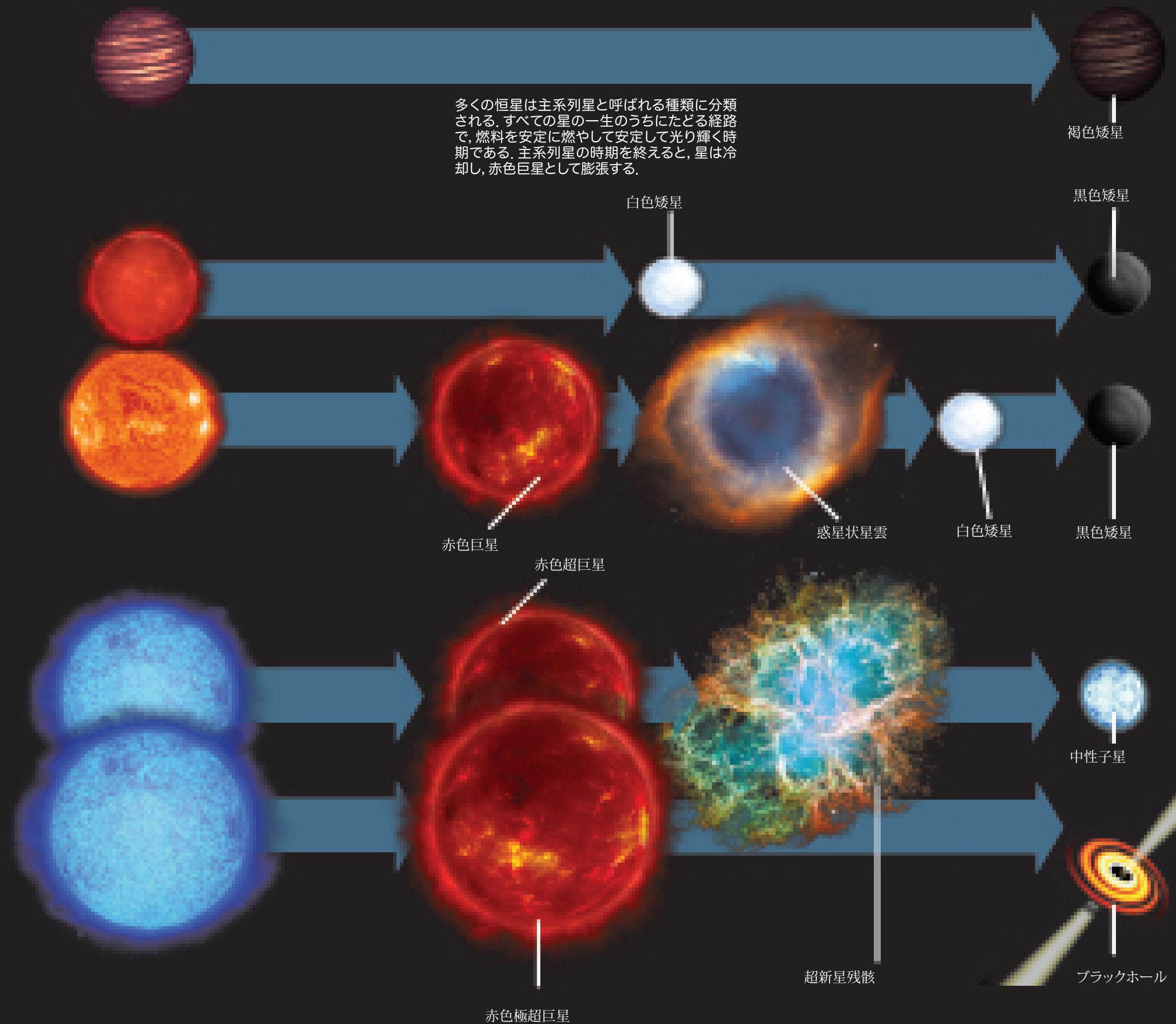
褐色矮星
質量：太陽の0.08倍
表面温度：1000°C
寿命(主系列)：不明

赤色矮星
質量：太陽の0.2倍
表面温度：3000°C
寿命：10兆年

太陽型恒星
質量：太陽の1倍
表面温度：5000°C
寿命：100億年

超巨星
質量：太陽の20倍
表面温度：12000°C
寿命：500万年

極超巨星
質量：太陽の100倍
表面温度：40000°C
寿命：100万年

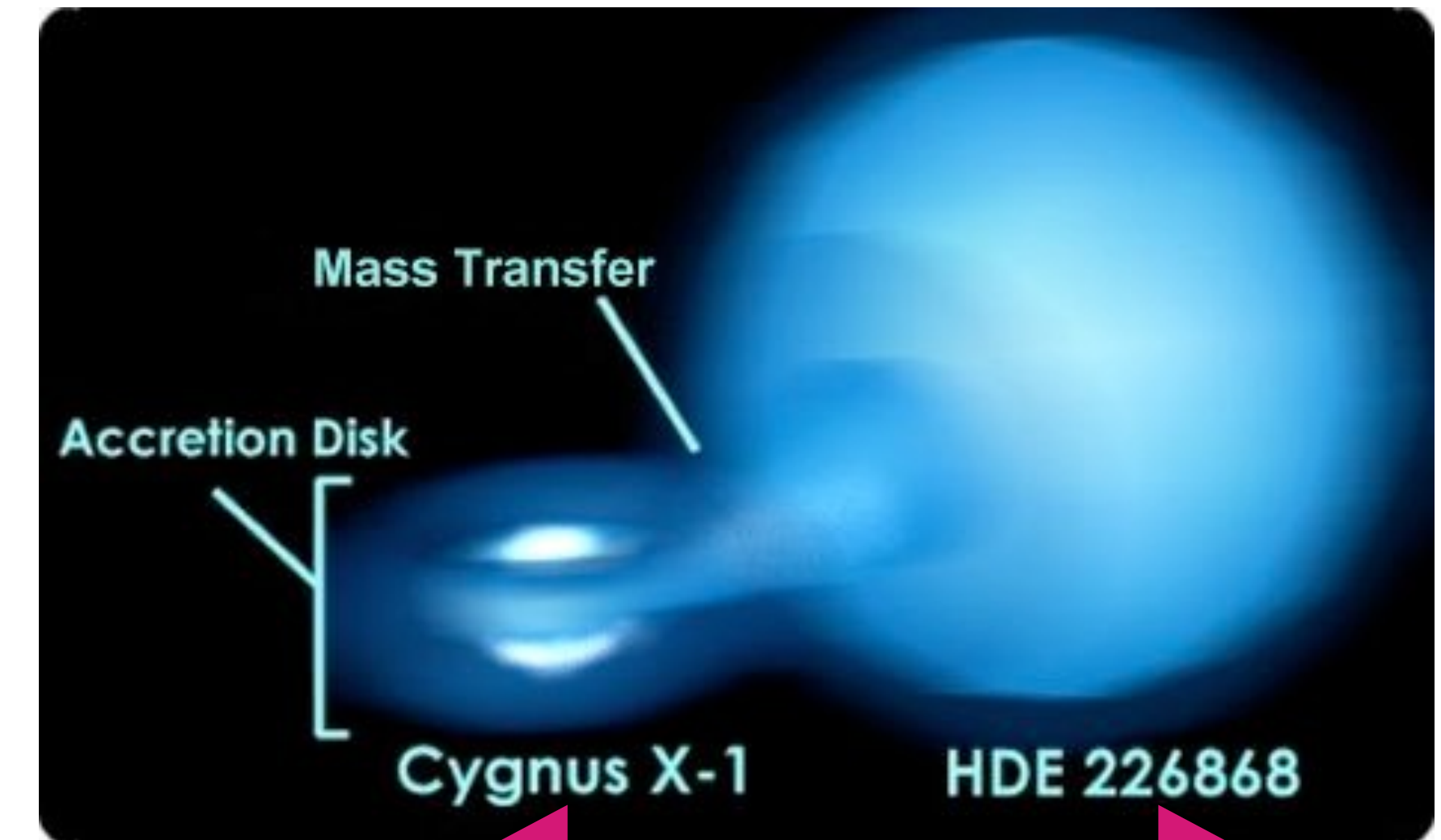
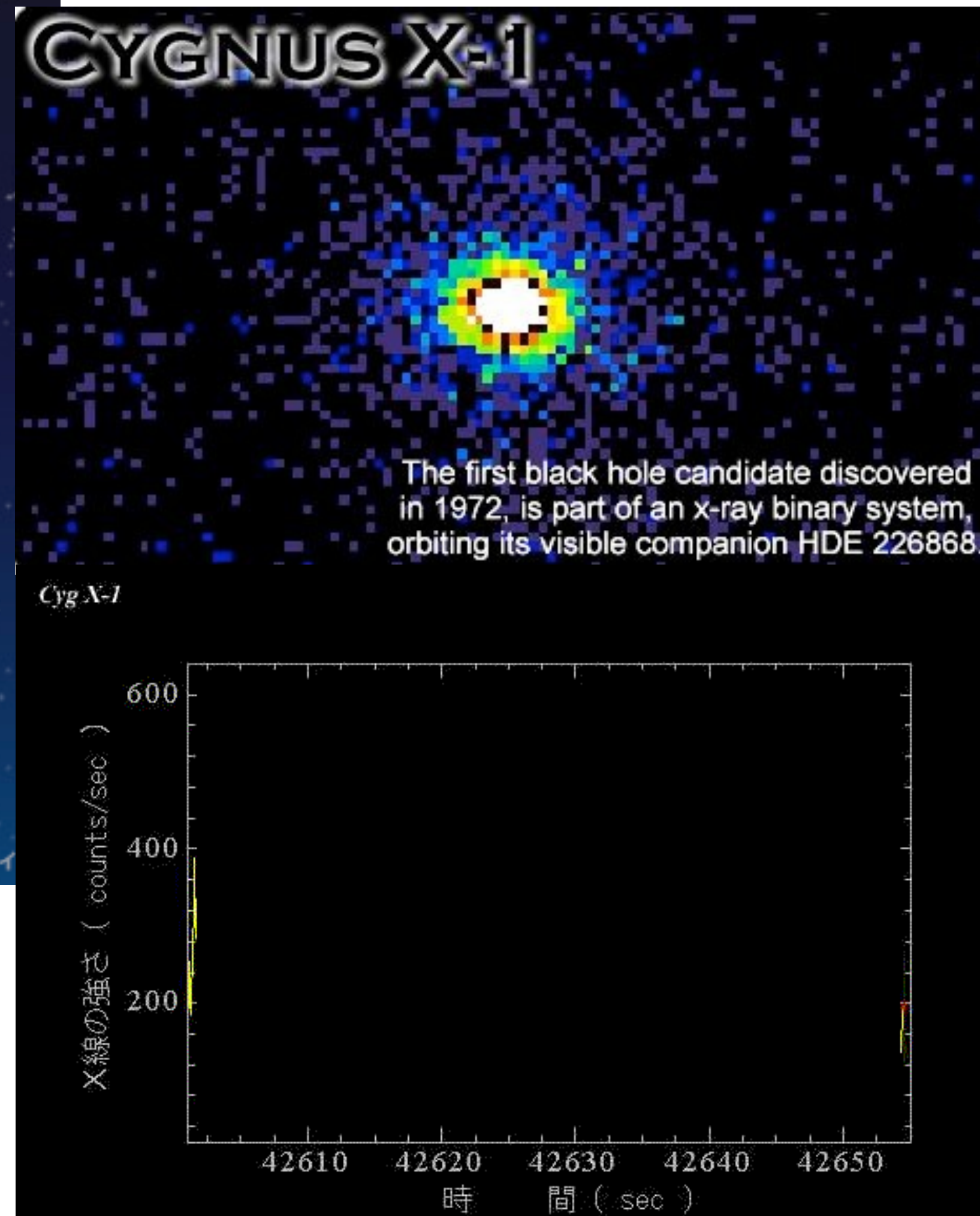


はくちょう座 X-1 はブラックホール

想像図



6000光年先



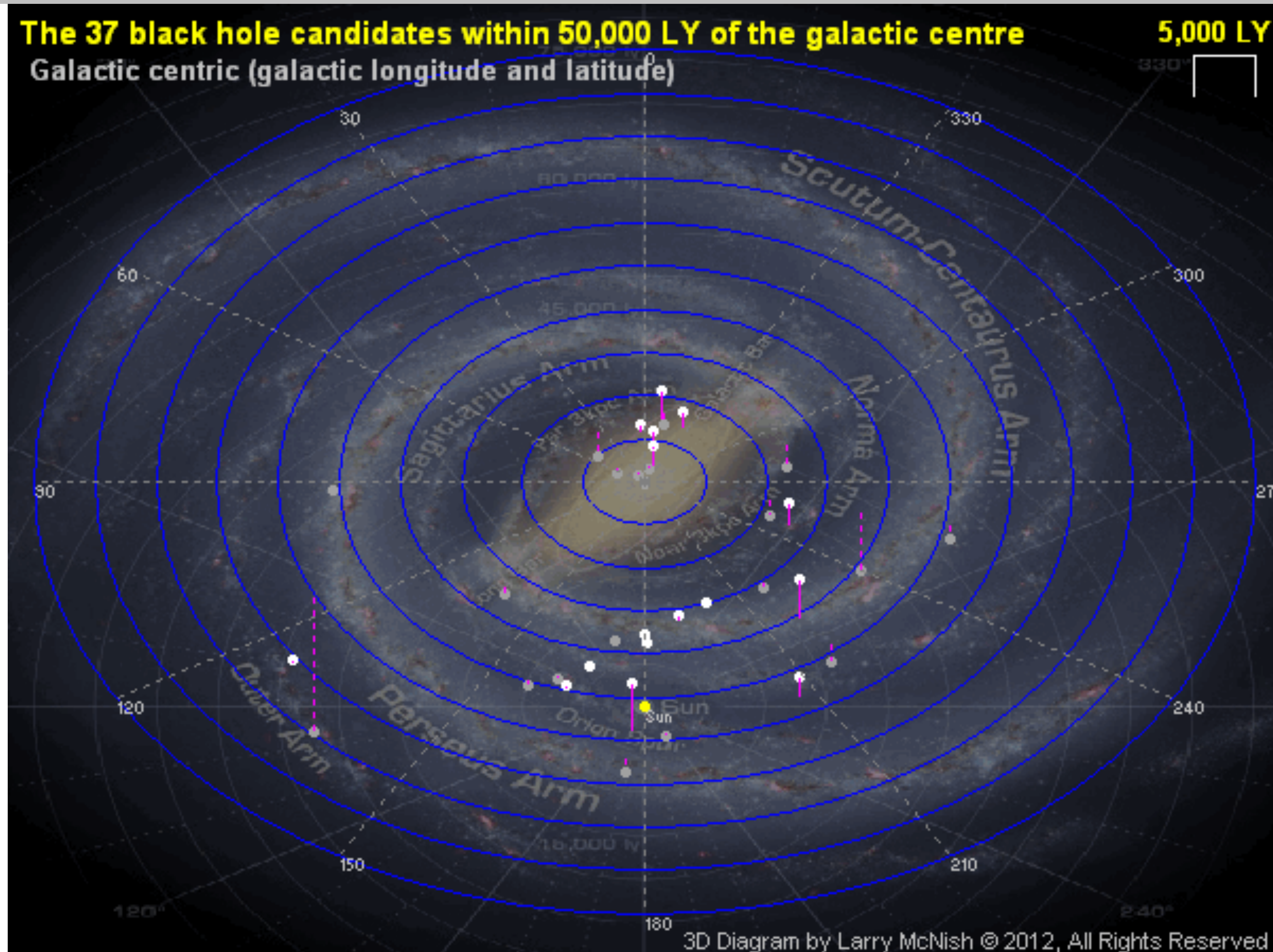
光の速さで1秒以下
(地球7.5周以下)
質量は太陽の10倍以上

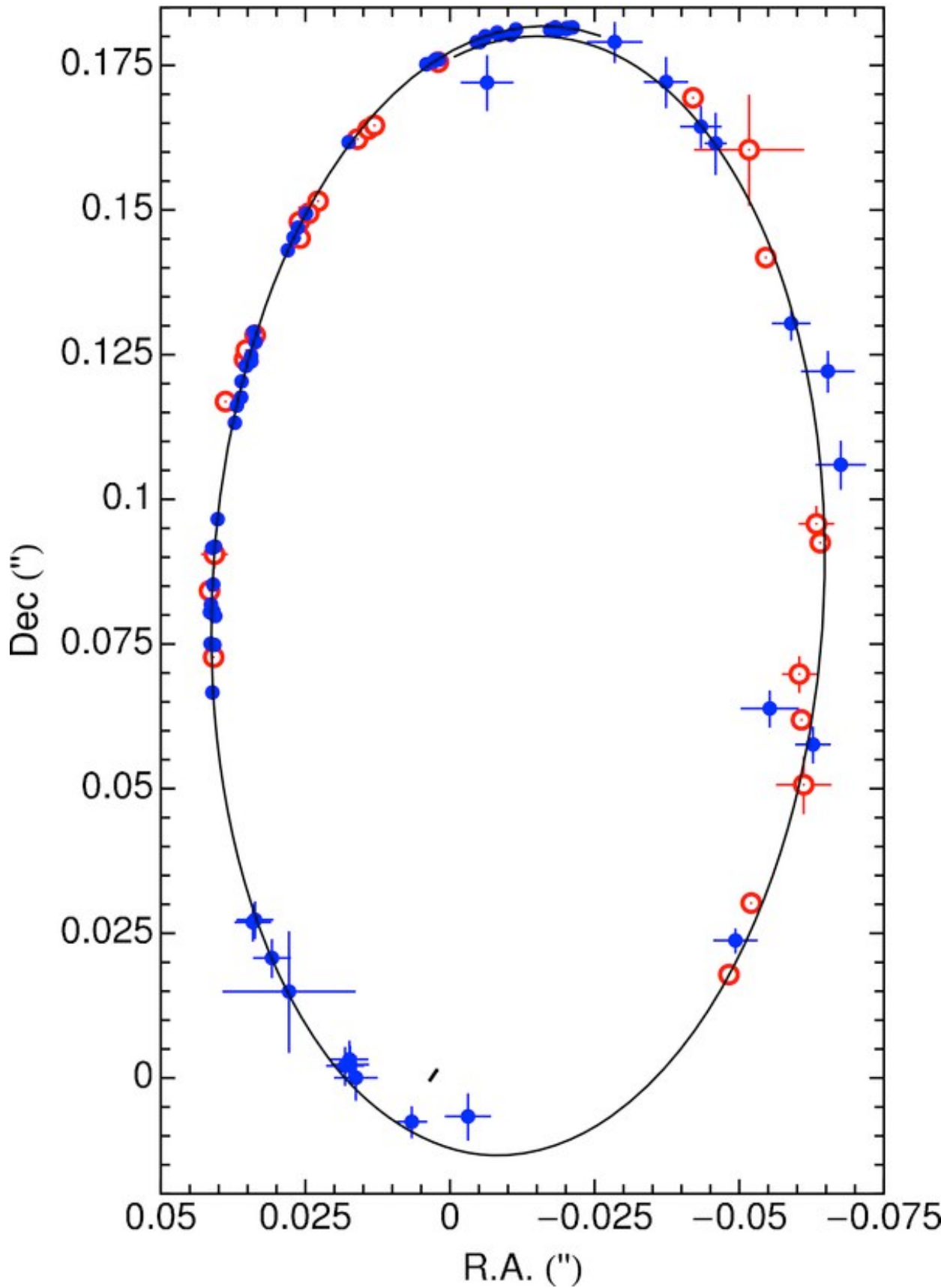
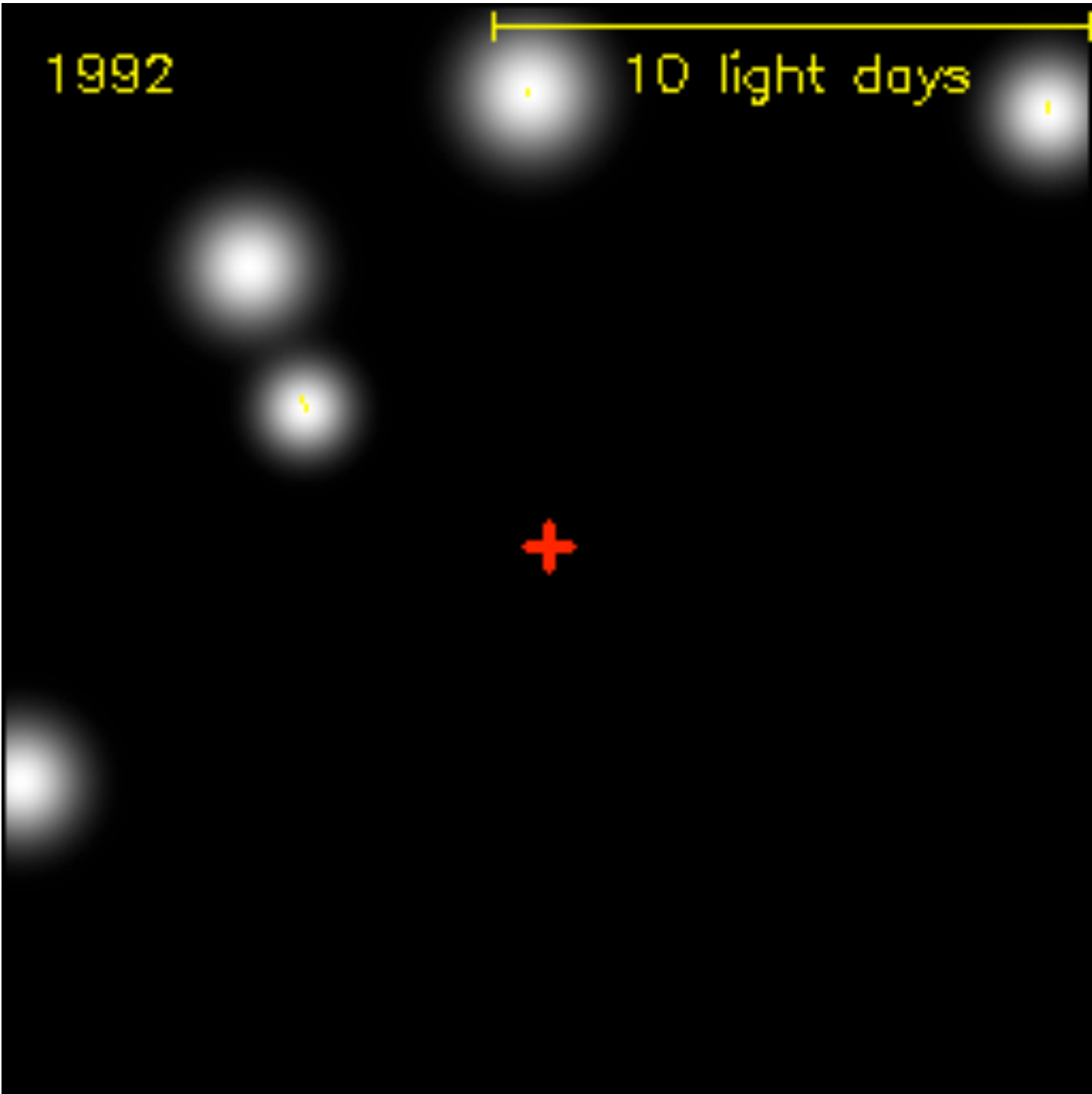
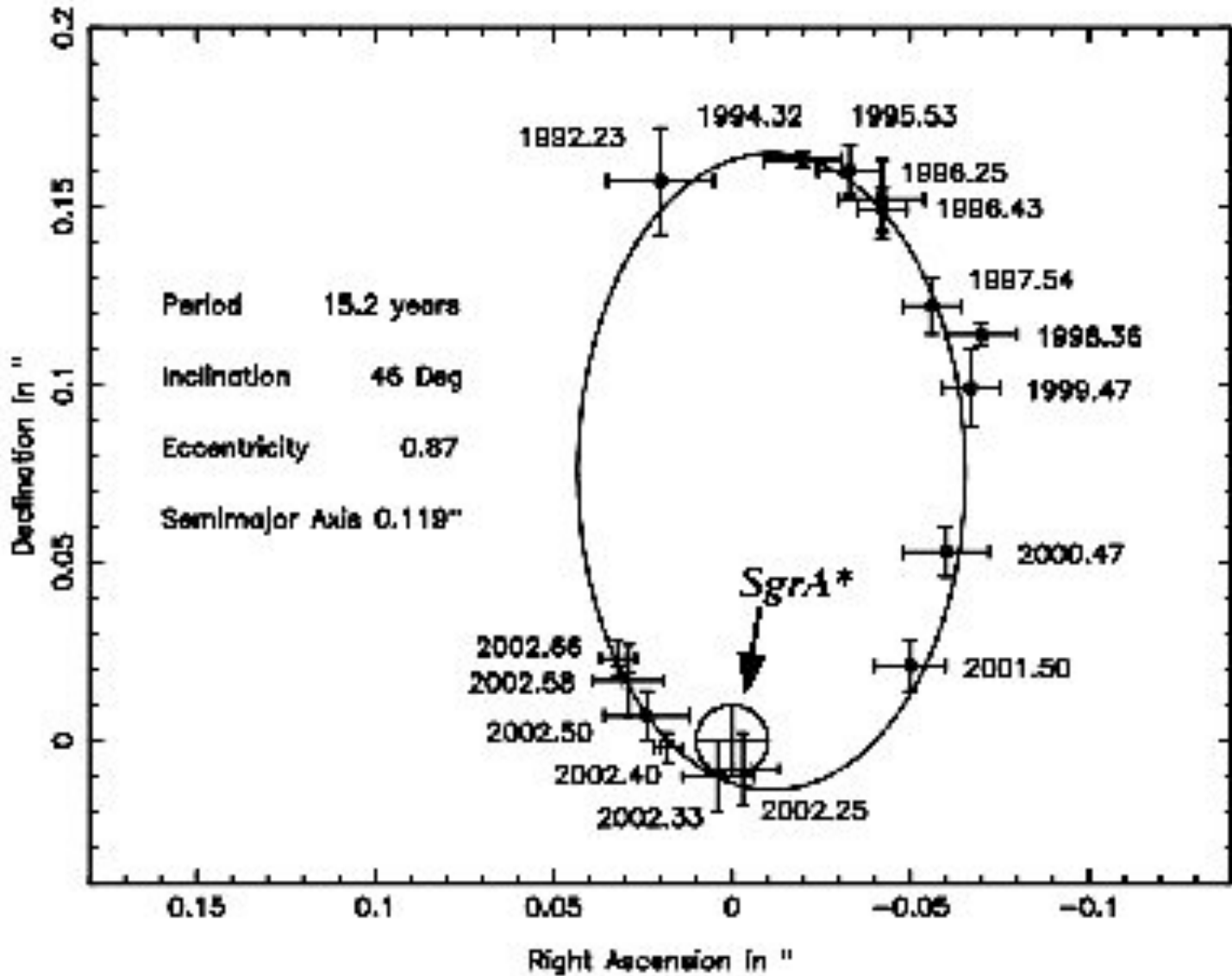
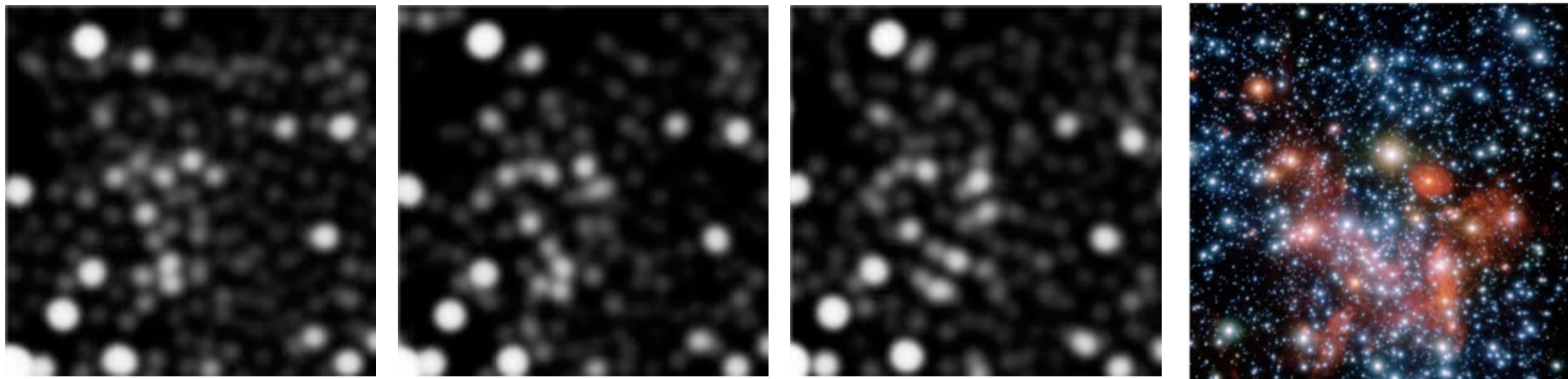
重くて小さな天体

はくちょう座 X-1の光度曲線 (energy band 1-37keV)

ブラックホール候補天体は50以上

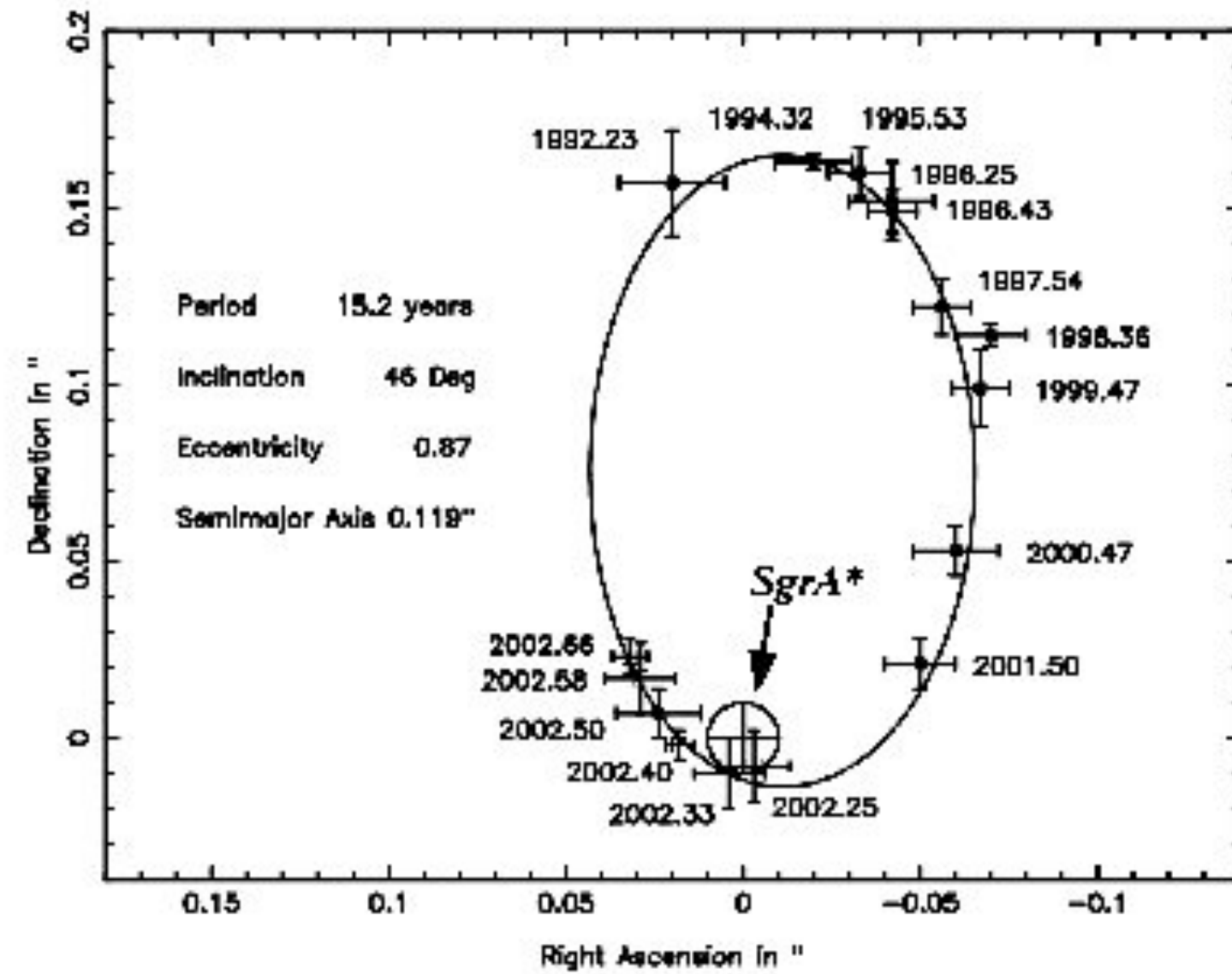
<http://calgary.rasc.ca/blackholes.htm>





<http://www.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm>
<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？

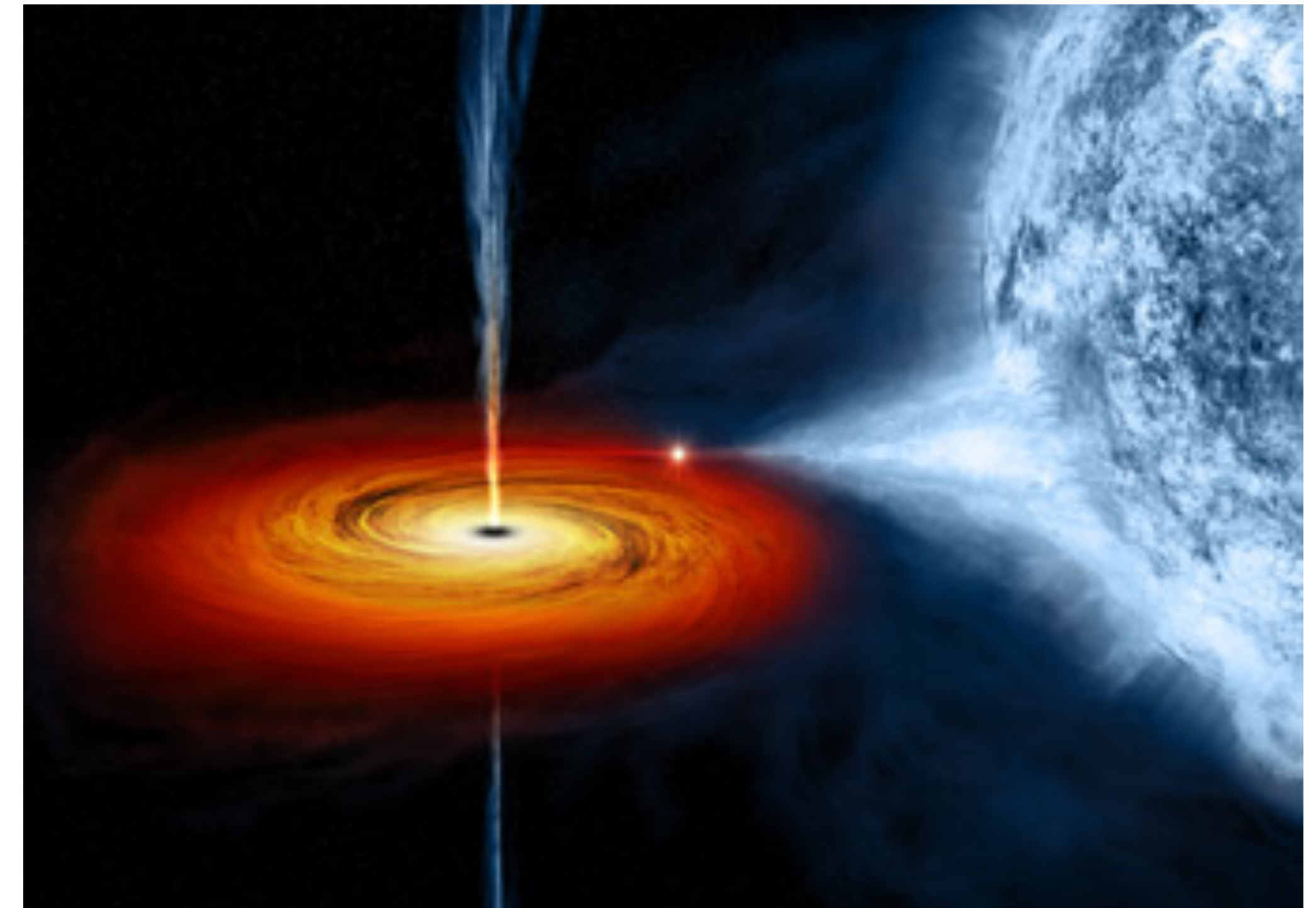


周りの星の激しい運動から
強い重力源であることがわかる

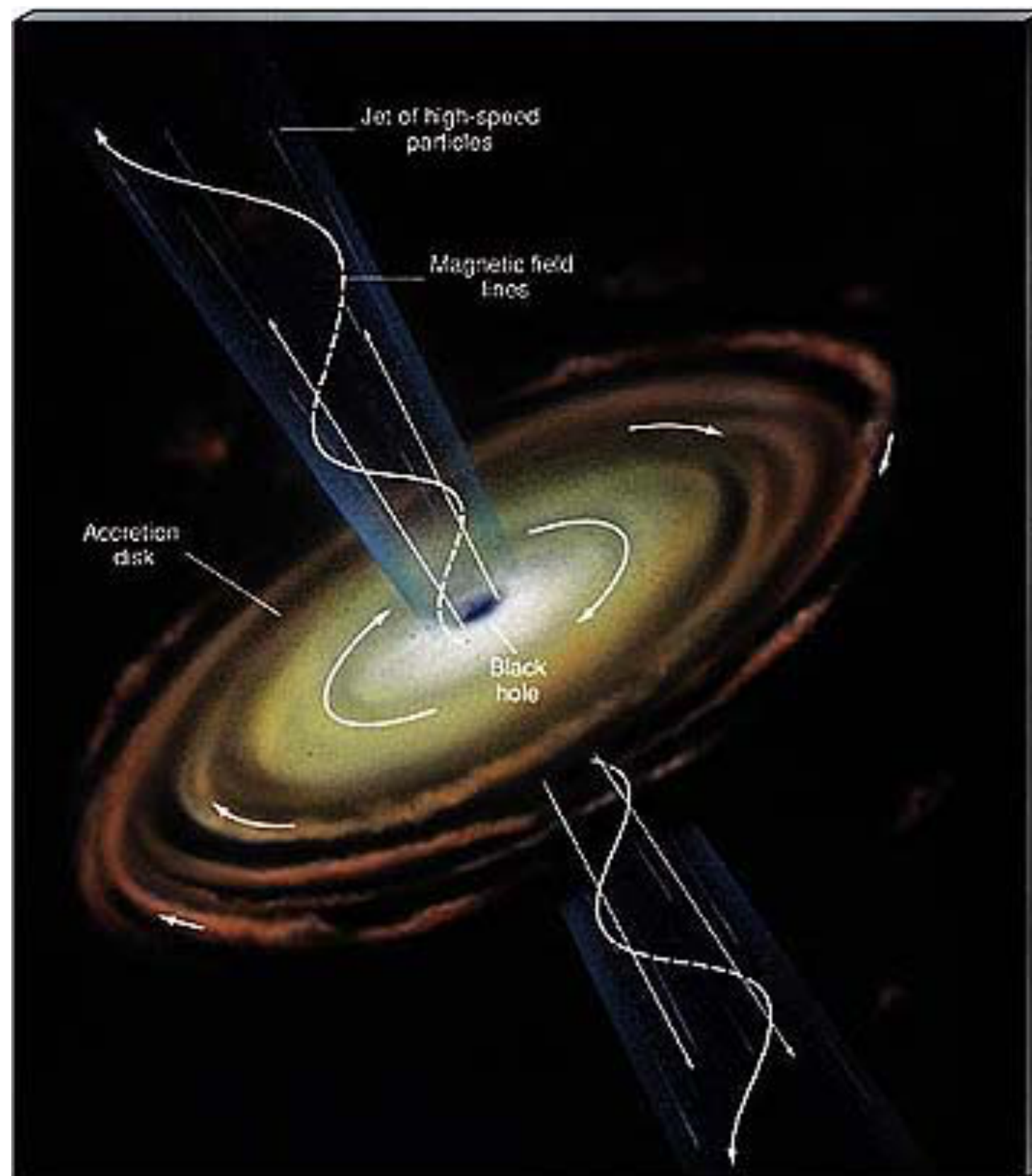
想像図

落下していくガスが
高い温度で輝く
(降着円盤 accretion disk)

「ブラックホールは明るい天体」

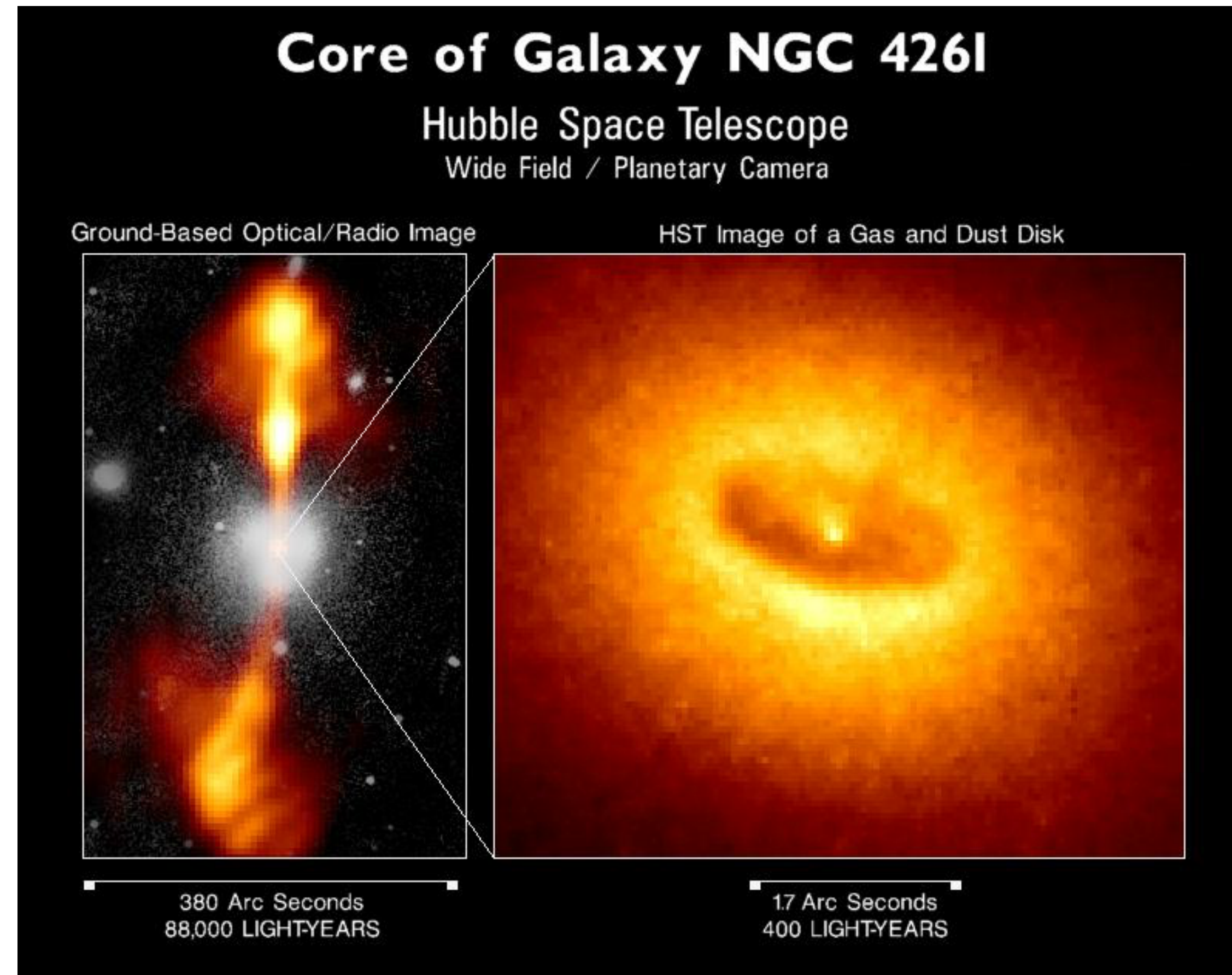


ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？



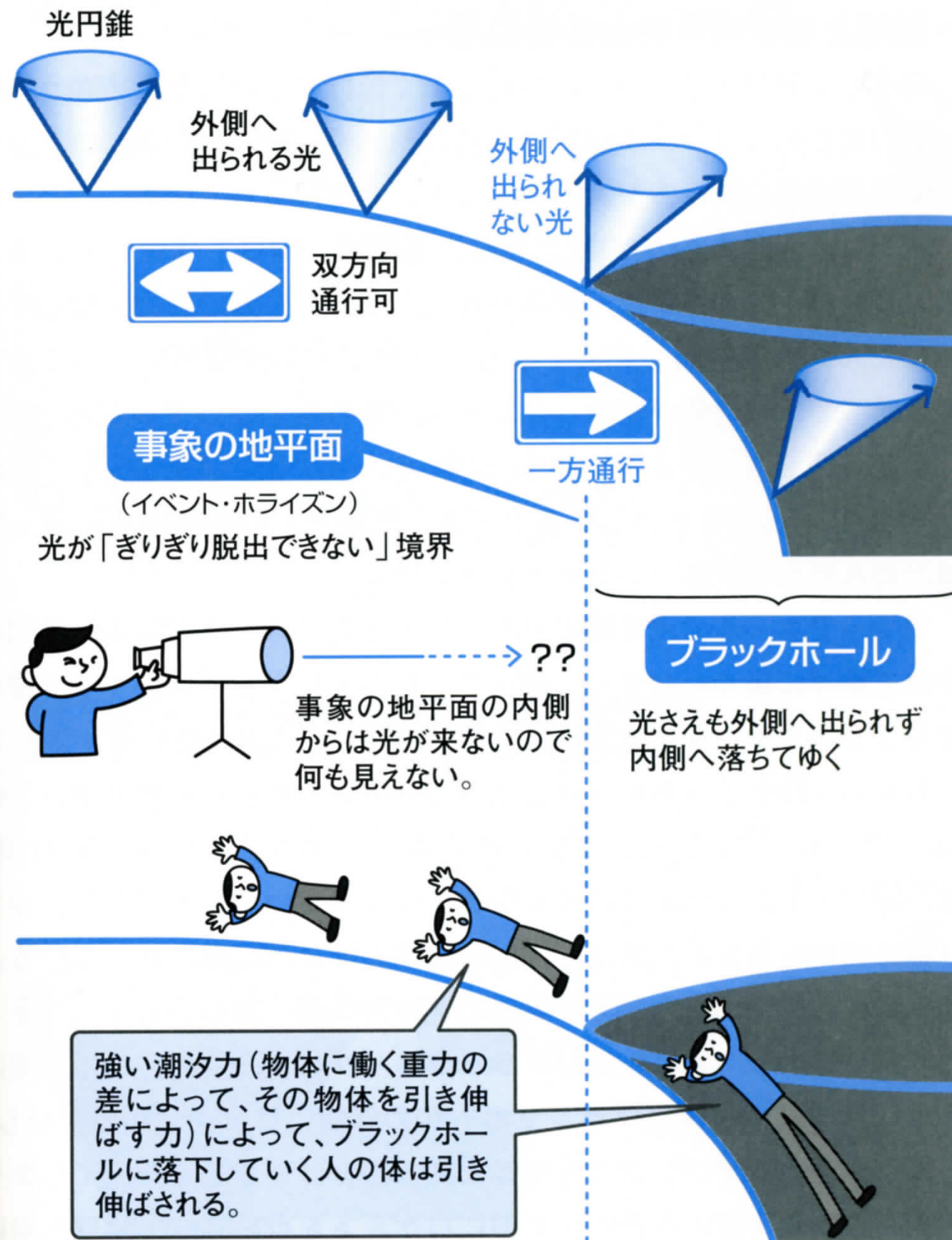
<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html>

想像図



銀河中心からジェットが吹き出す
(活動銀河核 active galactic nuclei)

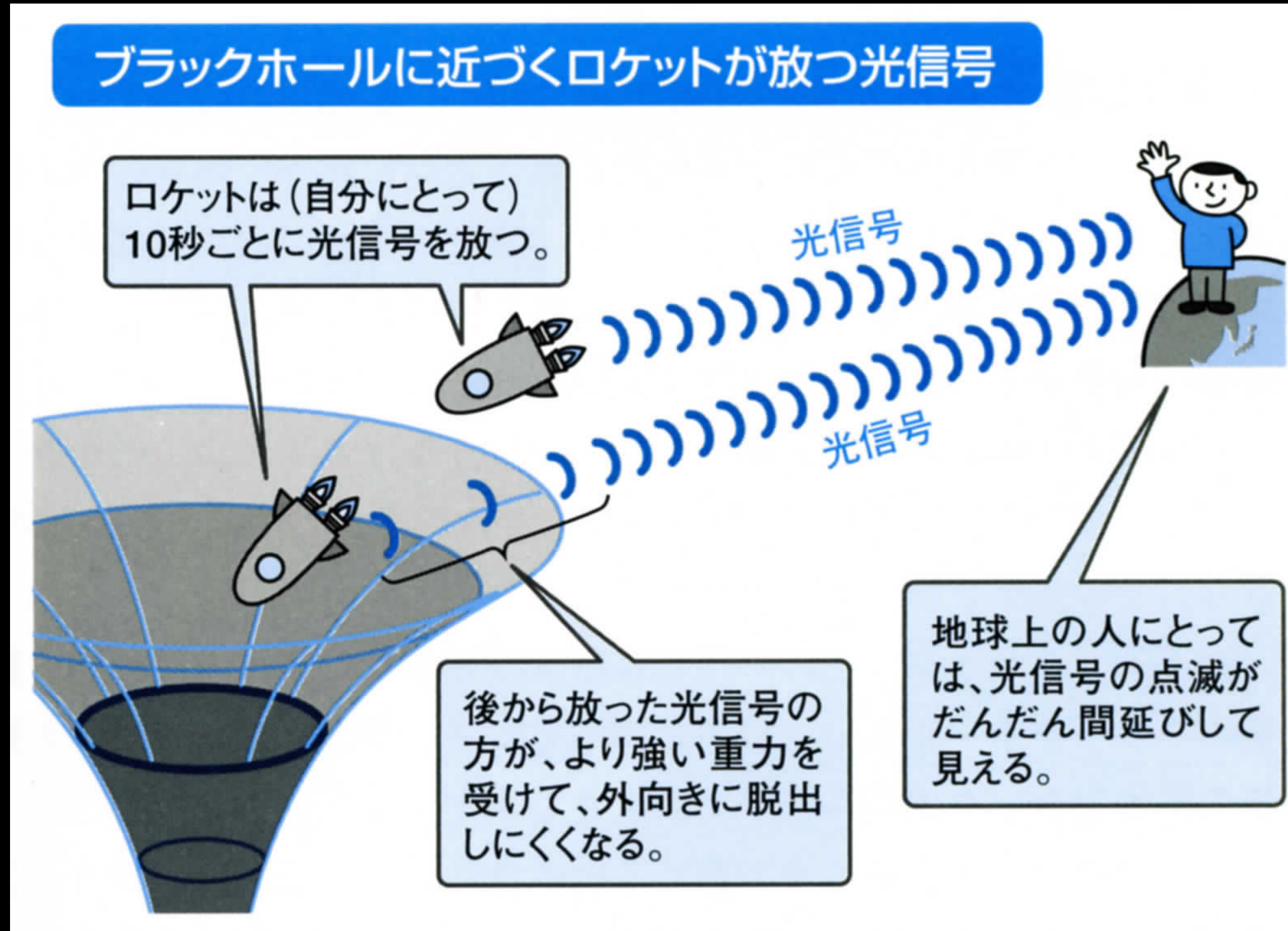
ブラックホールの事象の地平面



光が無限遠方まで到達できない領域を **ブラックホール** とよぶ
 ブラックホール領域の境界を **事象の地平面(Event Horizon)** とよぶ

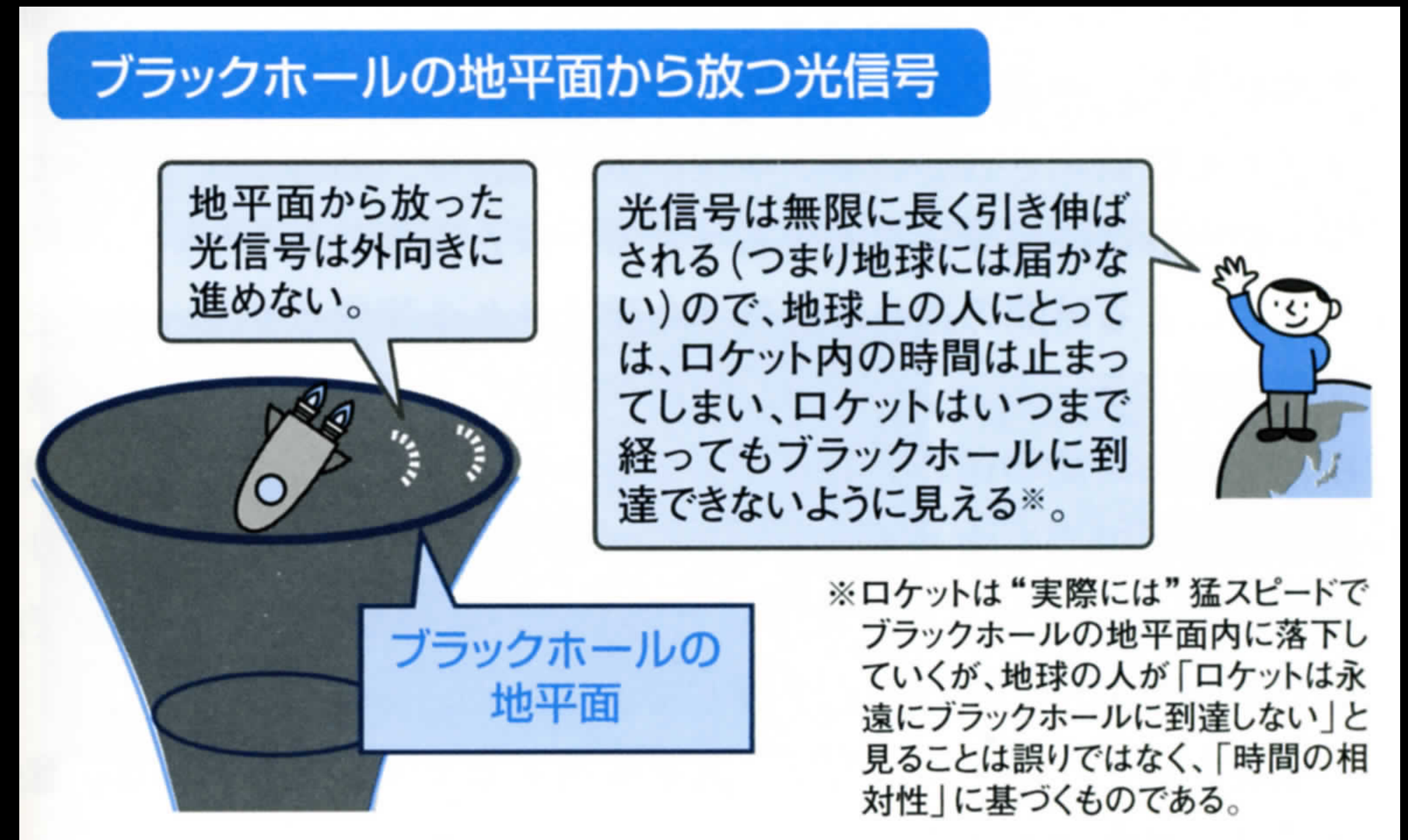
ブラックホールの内側は、非常に強い重力がはたらく
 強い潮汐力によって、落下する物体は引き伸ばされる



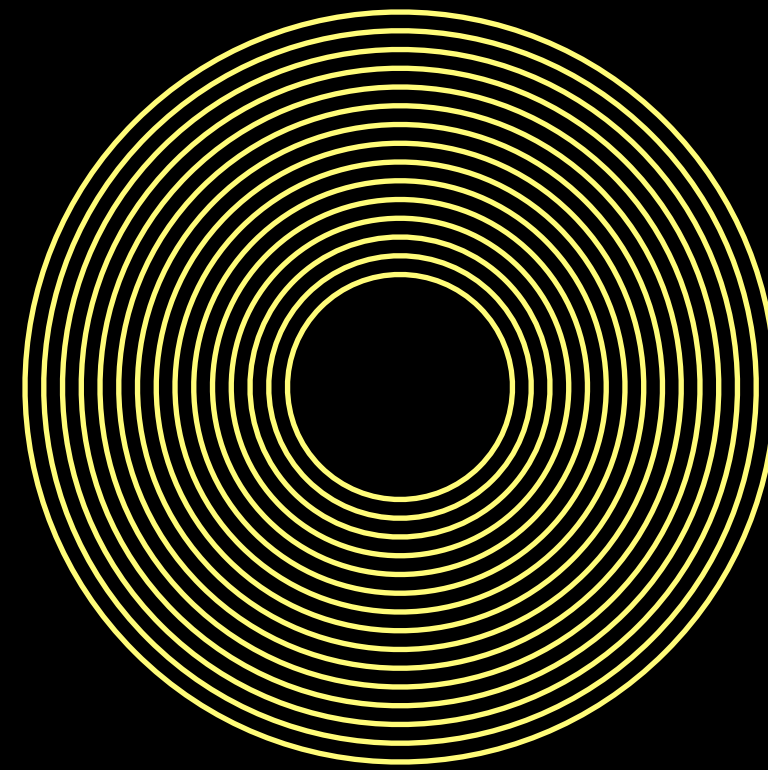


強い重力がはたらく空間と、平らな空間とでは時間の進み方が異なることになる。

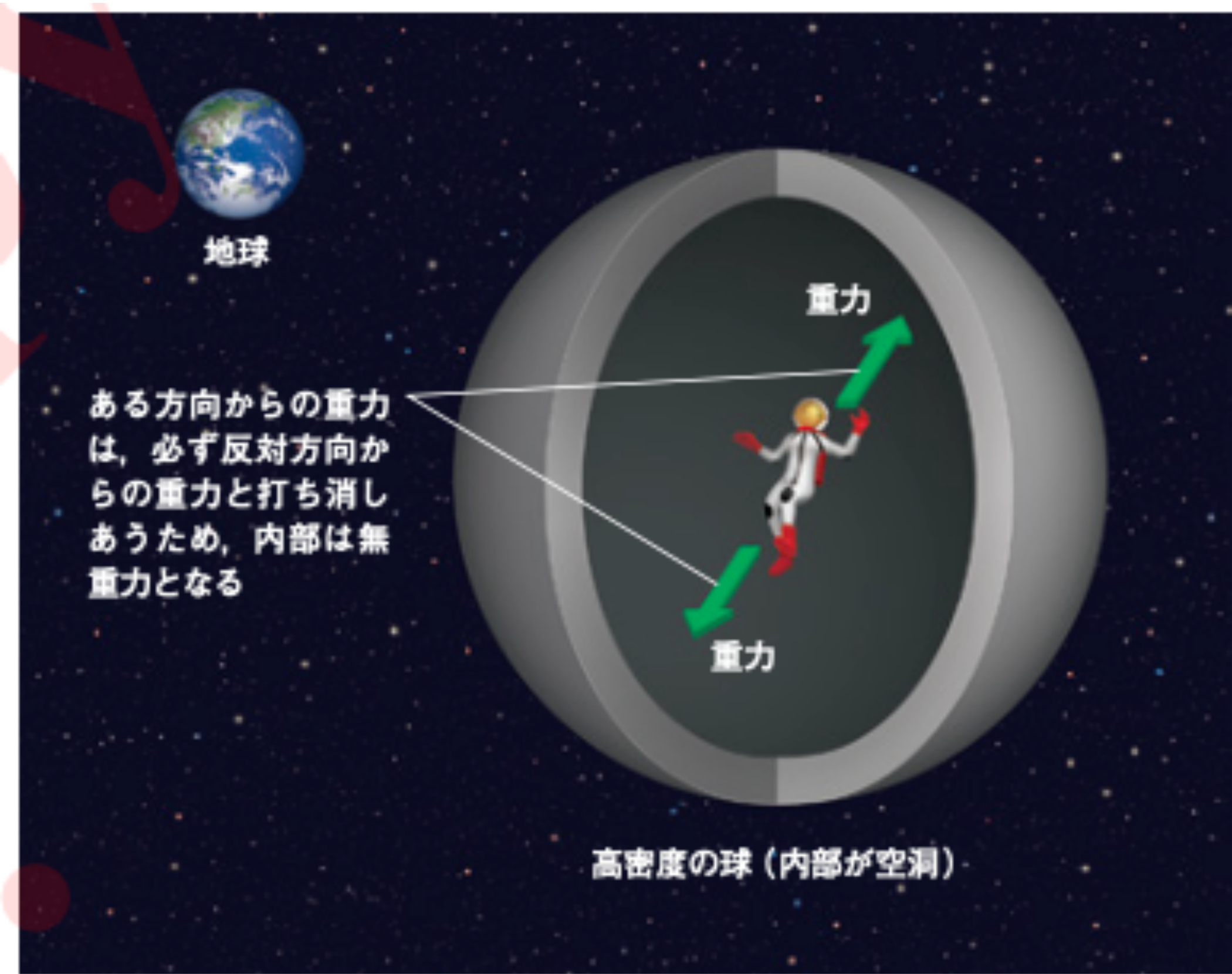
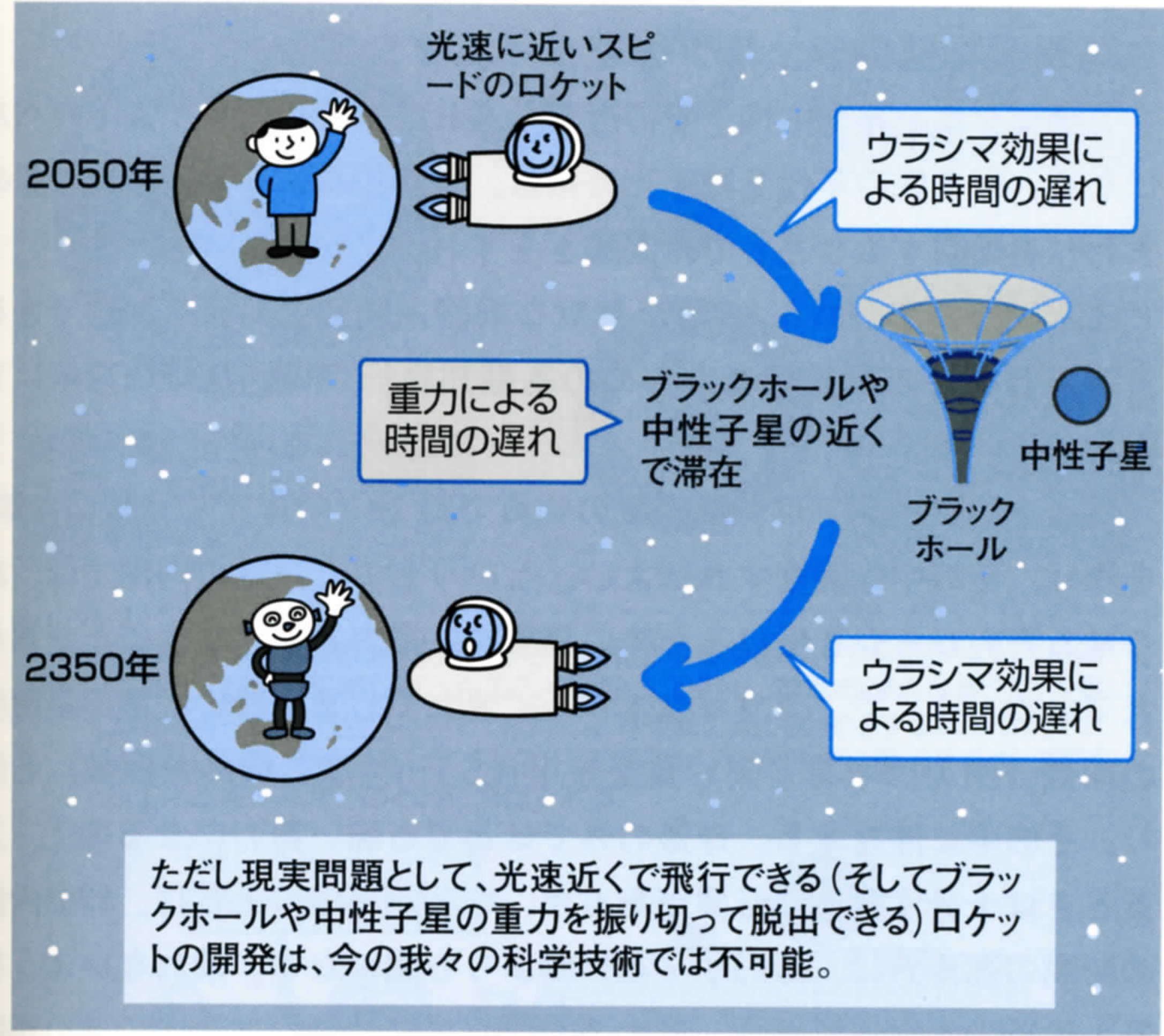
強い重力のとき、時間の進み方は遅い



ブラックホールに落下する人は、一瞬で終わり。
地球上の人には無限の時間がかかるように見える。



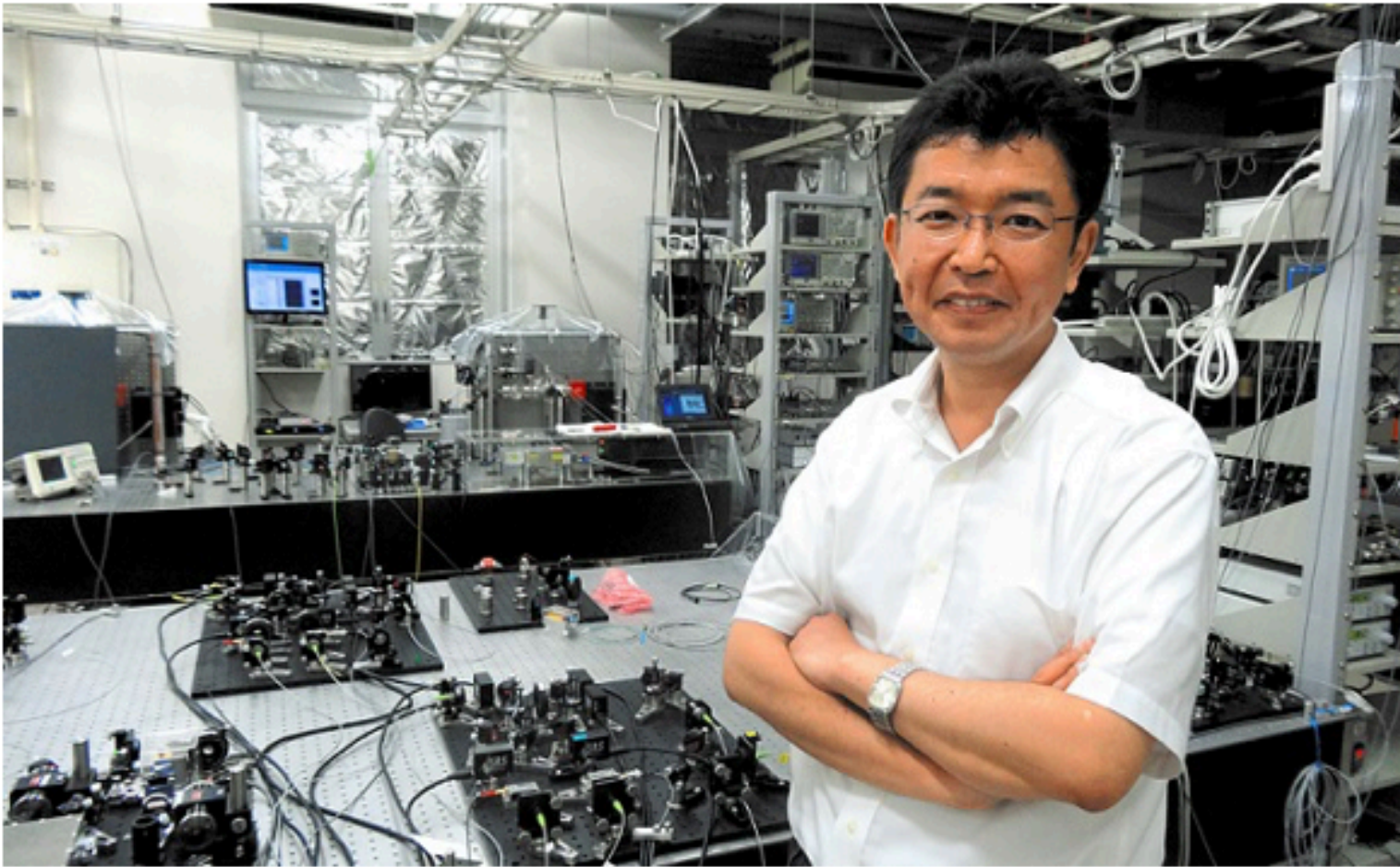
中心にあるブラックホールへ落ちていく宇宙ロケットが、
同じ間隔でパルス光信号を周囲に放つときの光信号の伝播
(光が次第にブラックホール近くから出てくるのに時間がかかる)



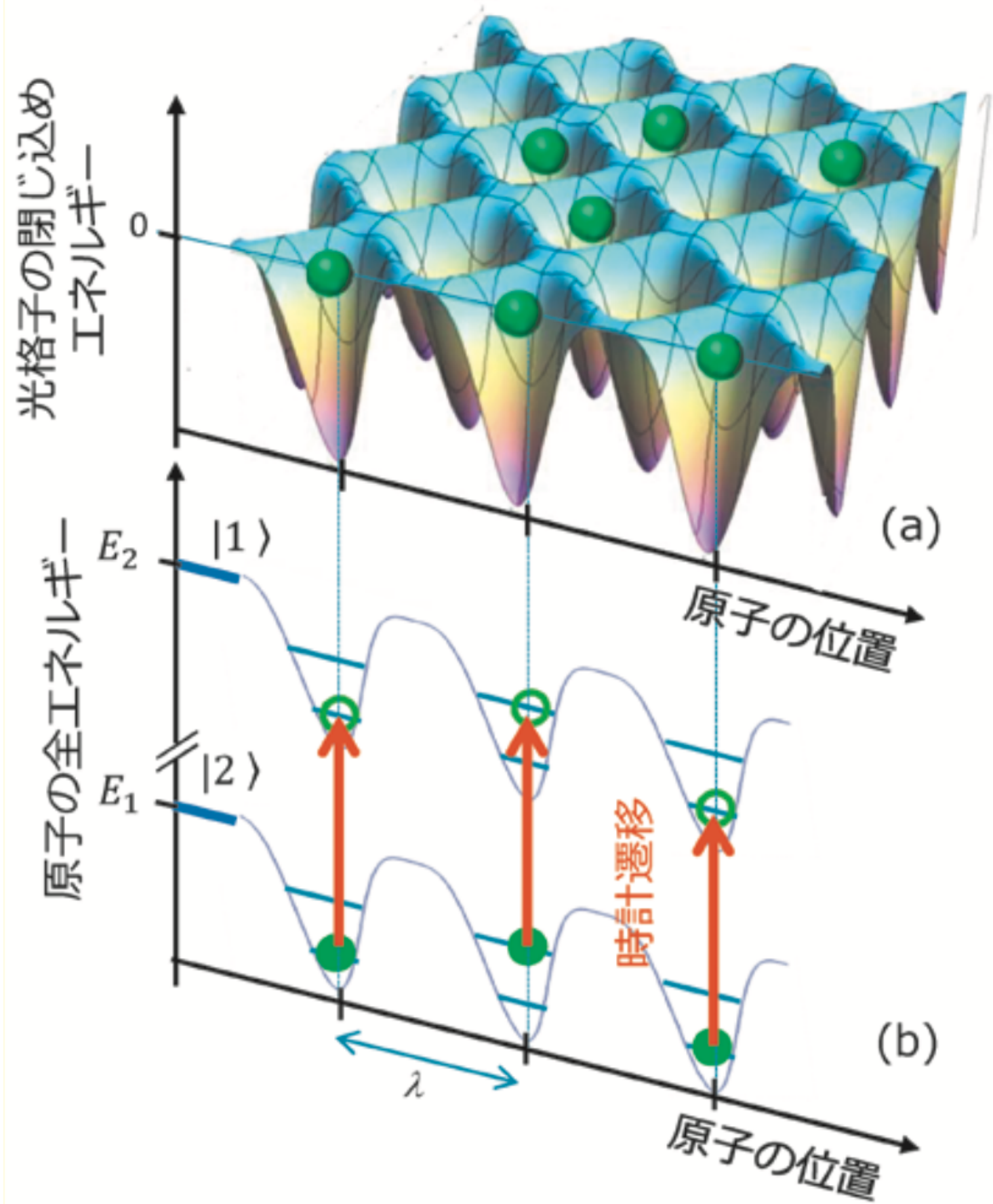
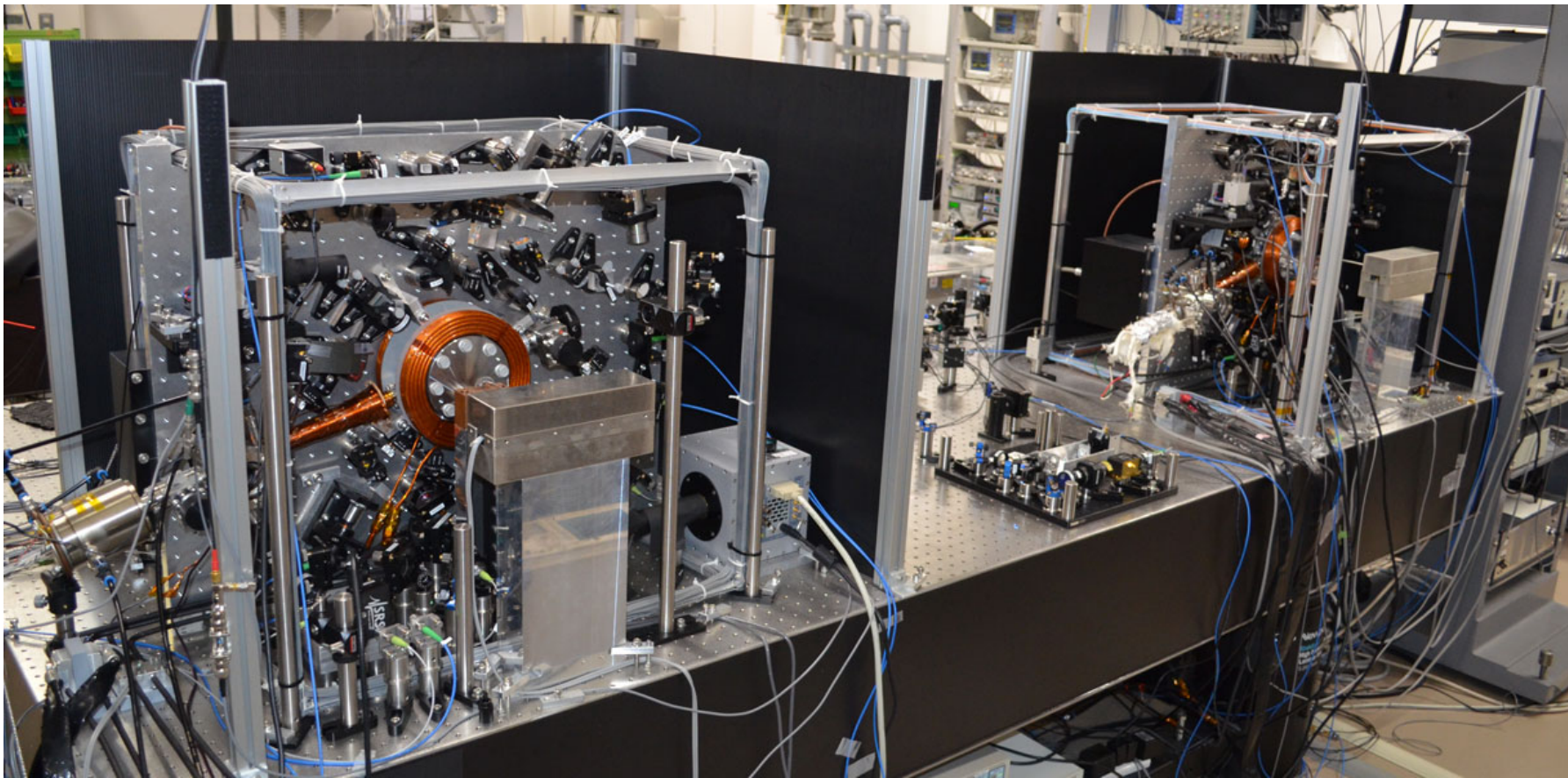
内部が空洞になった高密度の球に入って未来へ

質量が大きい高密度な球をつくり、内部を空洞にします。内部では、周囲からおよぼされる重力が打ち消し合うため無重力となります。無重力ではあるものの、強い重力をおよぼす球に囲まれているため、内部の空間の時間は地球にくらべてゆっくりと進みます。木星程度の質量を半径6メートル程度の球にすると、その内部の時間が進む速さは、外部にくらべて20%程度になるといいます。球の内部で1年すごせば、地球では5年程度がすぎるのです。

未来に行く第2の手段



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

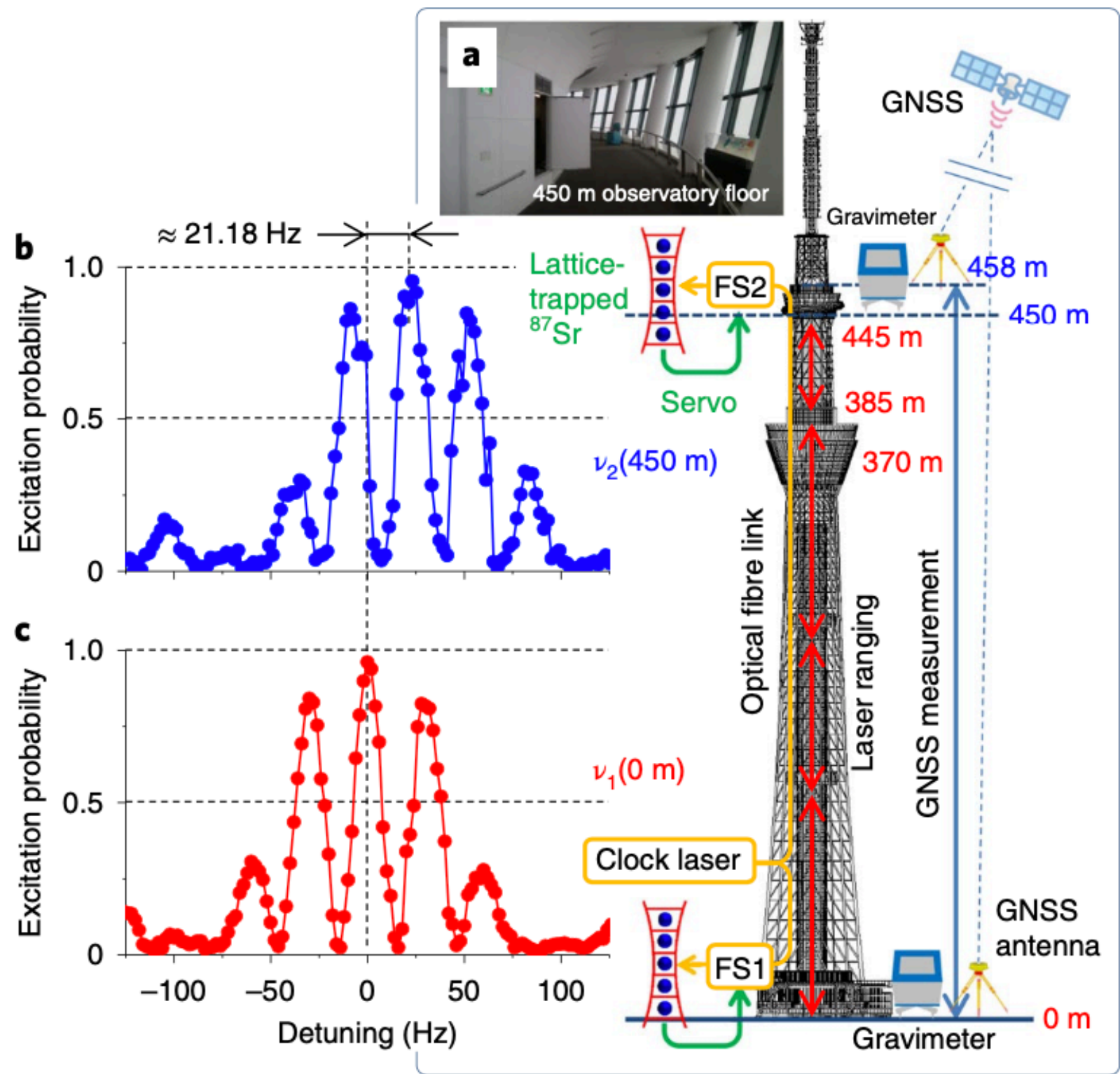


10⁻¹⁸ の精度を実現
(300億年ですれは1秒以内)

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

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

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



Nature Photonics, 14 (2020) 411



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

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

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

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

1 週間の計測. 平均して, 差が

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

レーザー測距では

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

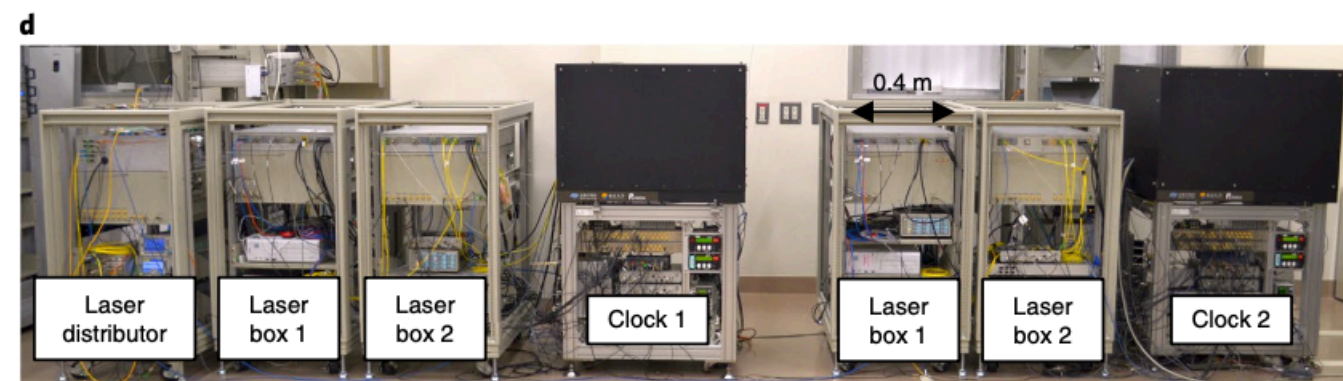
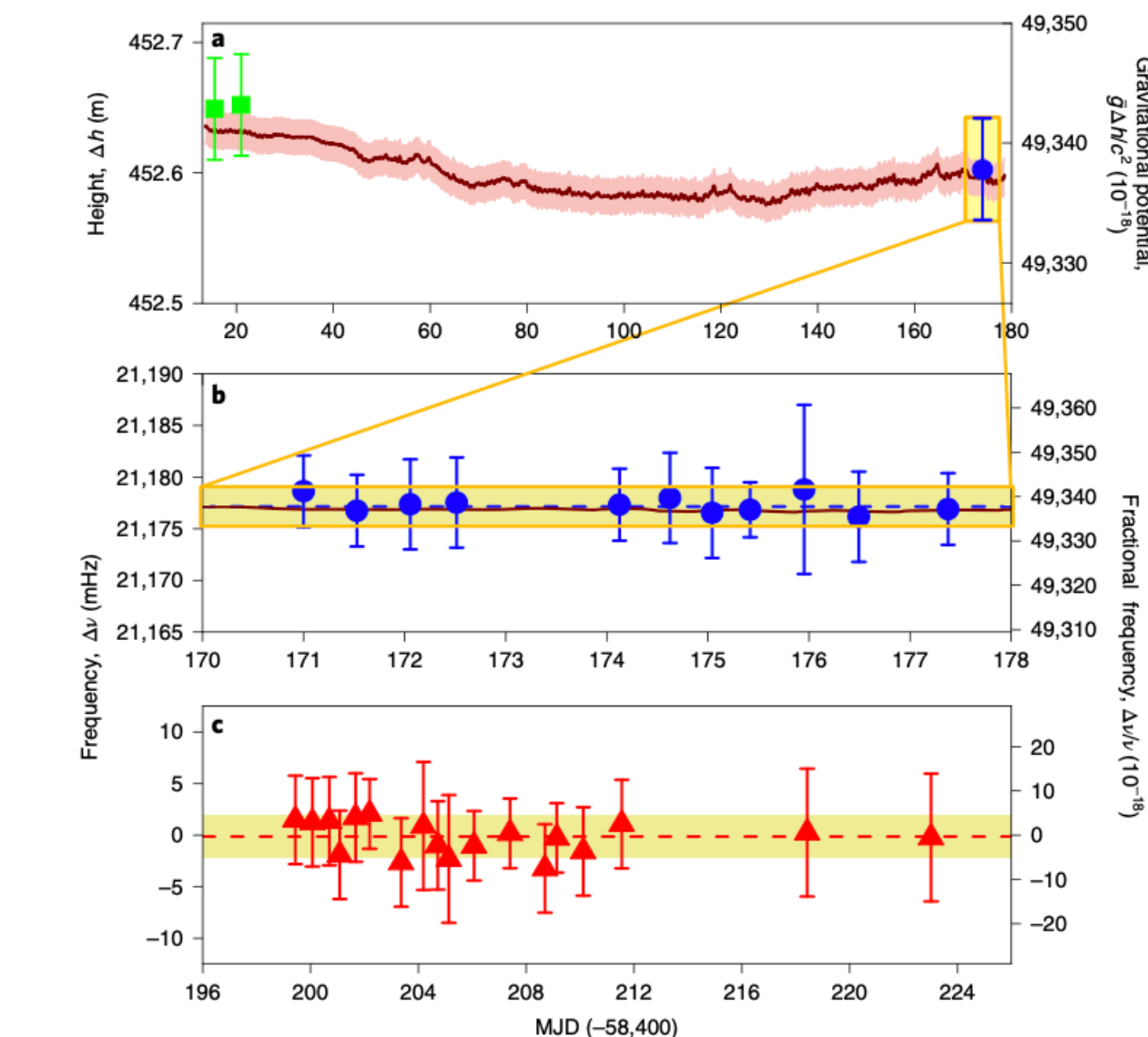
相対性理論の正しさを

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

の精度で検証したことになる

LETTERS

NATURE PHOTONICS





Physics Today 2020 July

冷蔵庫サイズの時計で，高度差450mを $\pm$ 数cm で測定できる.

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

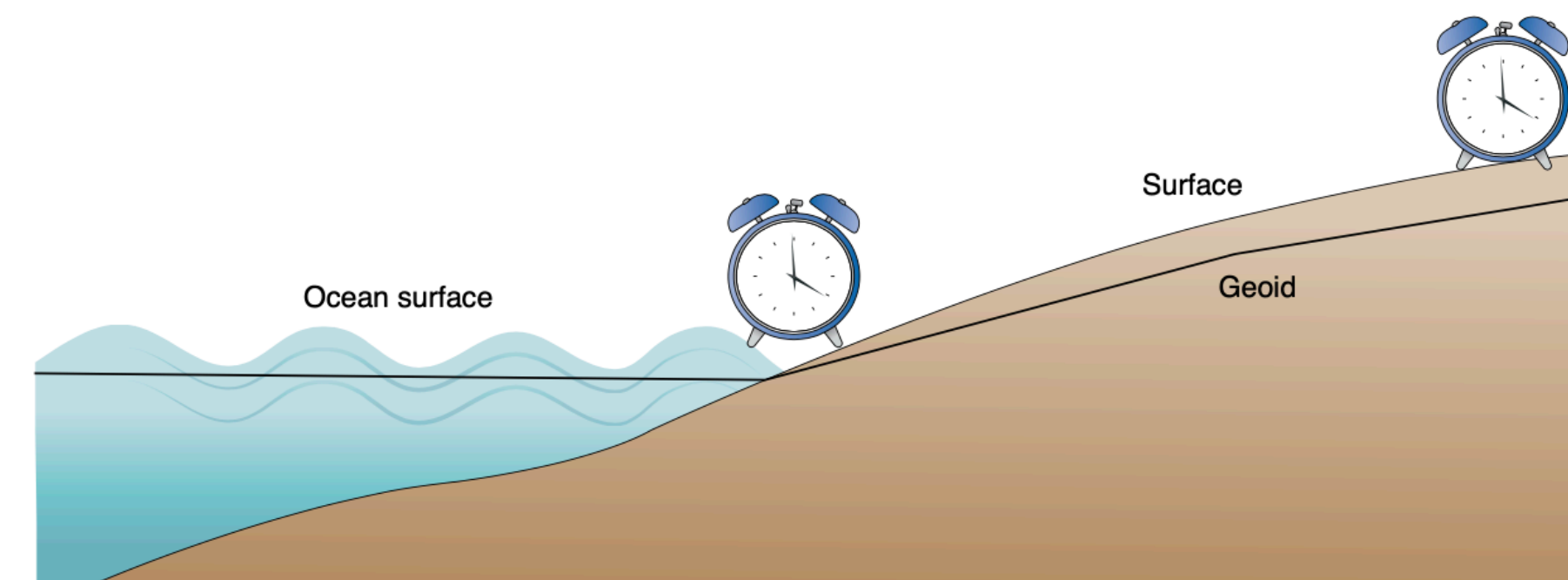


Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks. The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ.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

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



Interstellar | "Tidal Wave" Full Scene (Anne Hathaway, Matthew McConaughey) | Paramount Movies



Paramount Movies ✓
チャンネル登録者数 147万人

チャンネル登録

👍 2.2万



🔗 共有

✂️ クリップ



<https://www.youtube.com/watch?v=60h6lpnSgck>



Interstellar | "Tidal Wave" Full Scene (Anne Hathaway, Matthew McConaughey) | Paramount Movies

等速運動で 3年=300年

コラム 16 浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど1秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる．

$$\Delta T' = \sqrt{1 - (v/c)^2} \Delta T \quad (3.4)$$

↑
速度 v で移動している人の1秒

↑
静止している人の1秒

$$300 \text{ year} = \int_0^{3 \text{ year}} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt \quad \Rightarrow v = 0.9999499c$$

竜宮城は，光速の99.995%の速さで動いていた！

加減速運動で 3年=300年

いきなりこんな高速の宇宙船に乗るのは不可能であるし，元の場所に戻ってくることができない．そこで，加減速する宇宙船を考えよう．速度 v の宇宙船が測定する加速度 a' と，地球から見る宇宙船の加速度 a の間には，

$$a' = (1 - (v/c)^2)^{-3/2} a \quad (2)$$

の対応が得られる（例えば [22] を参照）．宇宙船の速度が地球から見て 0 から v_1 に一定加速度 a' で到達したとき，宇宙船内の経過時間 T' と地球の経過時間 T は，

$$T' = \frac{c}{2a'} \log \frac{1 + v_1/c}{1 - v_1/c}, \quad (3)$$

$$T = \frac{v_1}{a' \sqrt{1 - (v_1/c)^2}} \quad (4)$$

で与えられる．浦島太郎が 300 年先の未来へ 3 年で到達するには，重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ の 9.43 倍で加速する宇宙船で 0.75 年加速，すぐに同じ大きさに逆向きの加速度で減速して 0.75 年で停止．直ちに同じ運動で地球に帰還すればよいことがわかる．しかし，この加速度はなかなか厳しい．

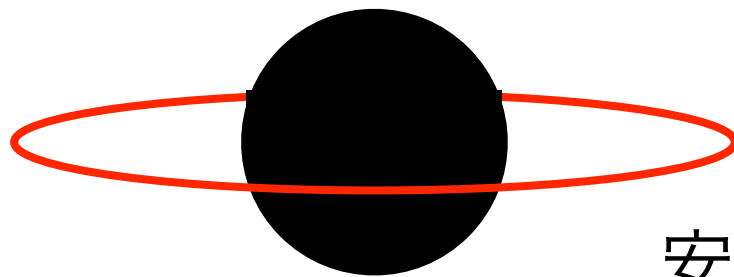
9.43Gで加減速される3年！

Schwarzschildブラックホールを周回 (回転していない)

$$(dT)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) (dT')^2$$

静止している人の1秒

BH時空の1秒



安定円軌道はBH半径の3倍より遠く

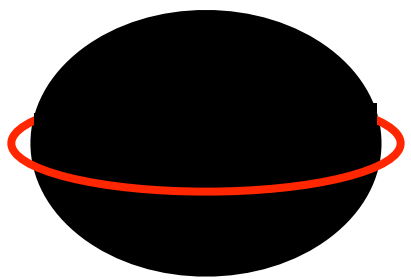
1.224倍の時間差が限界

Kerrブラックホールを周回 (回転パラメータ a)

$$(dT)^2 = \left(1 - \frac{2GMr/c^2}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) (dT')^2$$

静止している人の1秒

BH時空の1秒



BHが最大回転をしているときは、
安定円軌道はBH半径近傍にまで近づく！

太陽質量の30倍のBH

最大回転の70%で回転

▶▶ BH半径の1.0001 倍のところを周回すれば100倍に



Interstellar (2014)



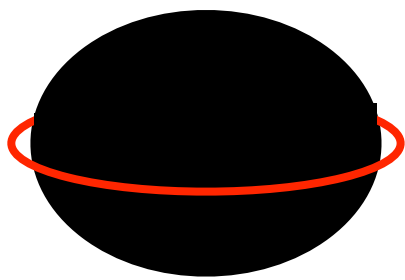
Executive Producer: Kip Thorne

Kerrブラックホールを周回 (回転パラメータ a)

$$(dT)^2 = \left(1 - \frac{2GMr/c^2}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) (dT')^2$$

静止している人の1秒

BH時空の1秒



BHが最大回転をしているときは、
安定円軌道はBH半径近傍にまで近づく！

太陽質量の30倍のBH
最大回転の70%で回転
▶▶ BH半径の1.0001 倍のところを周回すれば100倍に

太陽質量の 10^8 倍のBH
最大回転の99.999999999999999%で回転
▶▶ BH半径の1.00002 倍のところを周回すれば
1 時間 = 7 年に

Interstellar よりはマシ

“ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大

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

ラインハルト・ゲンツェル (68) 独マックスプランク研究所

アンドレア・ゲズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに
対して」

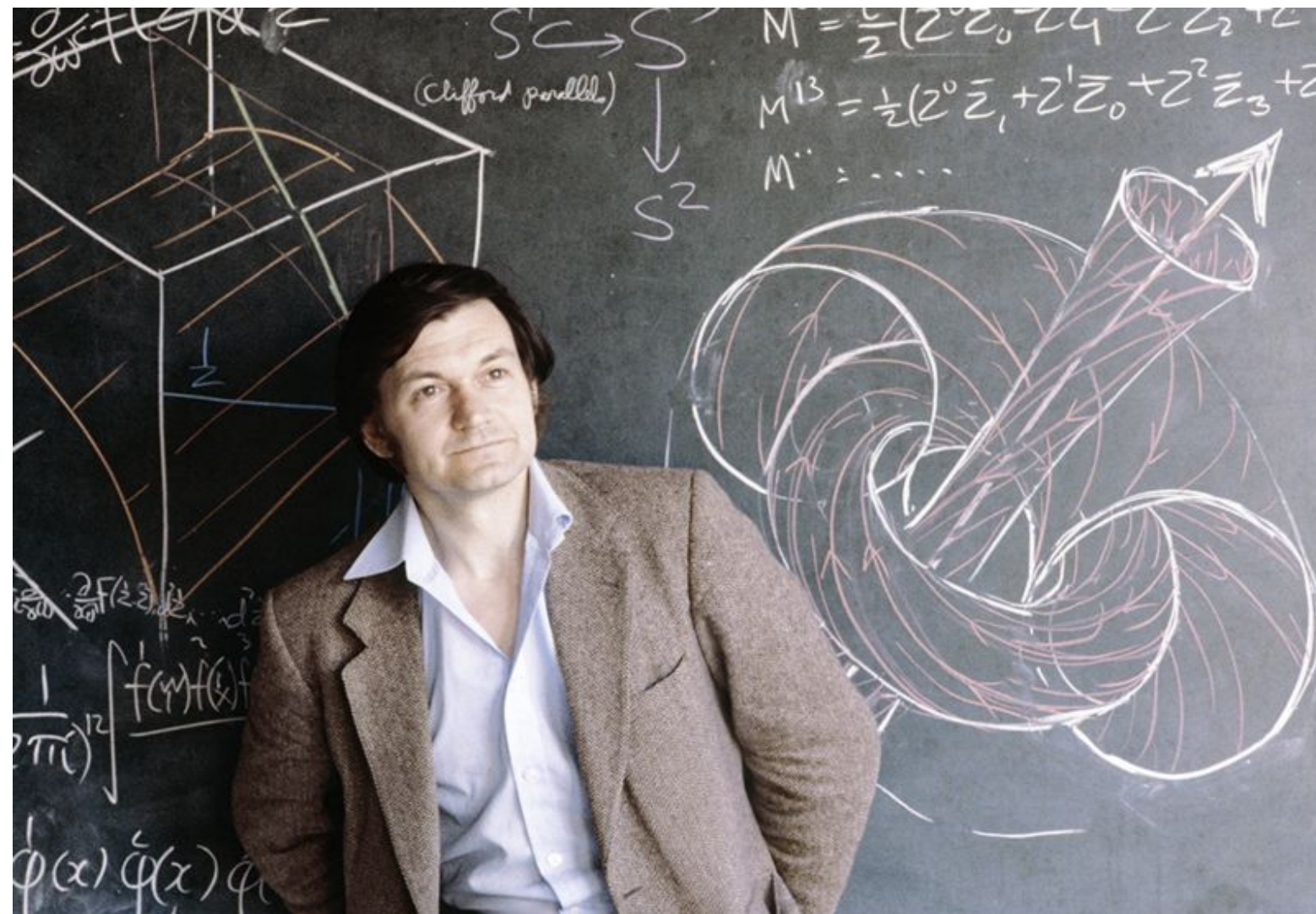


Roger Penrose “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”

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

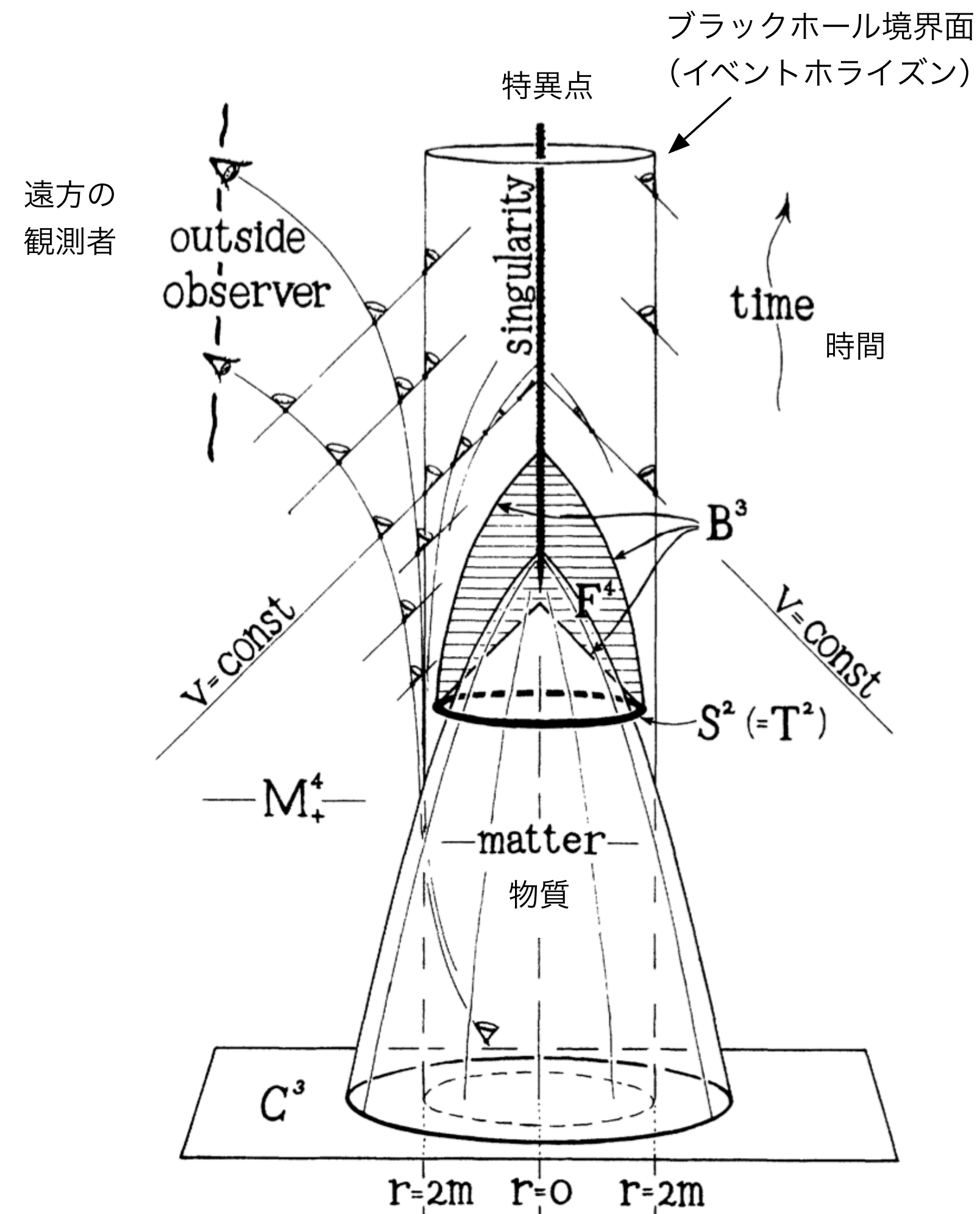


「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

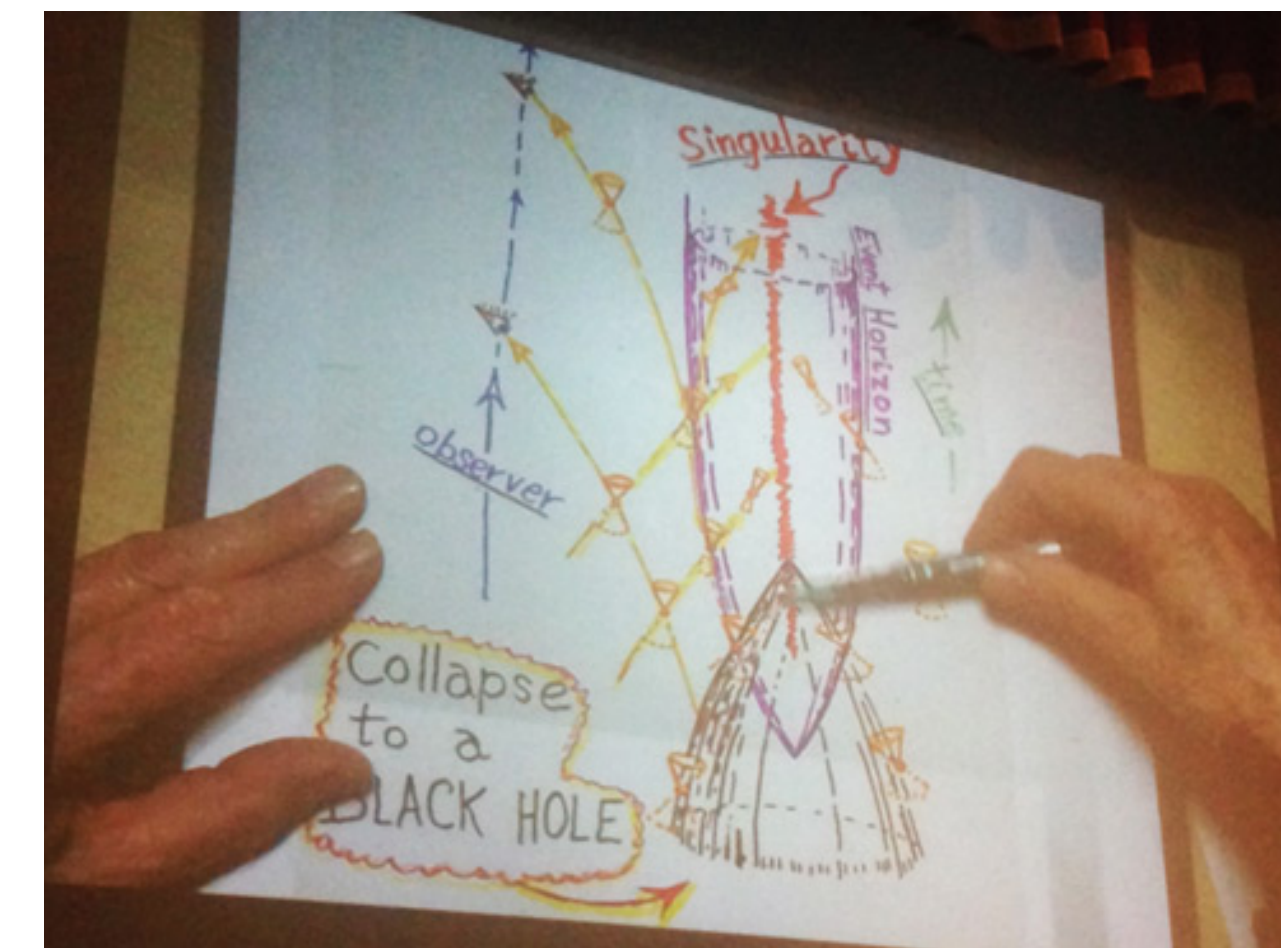
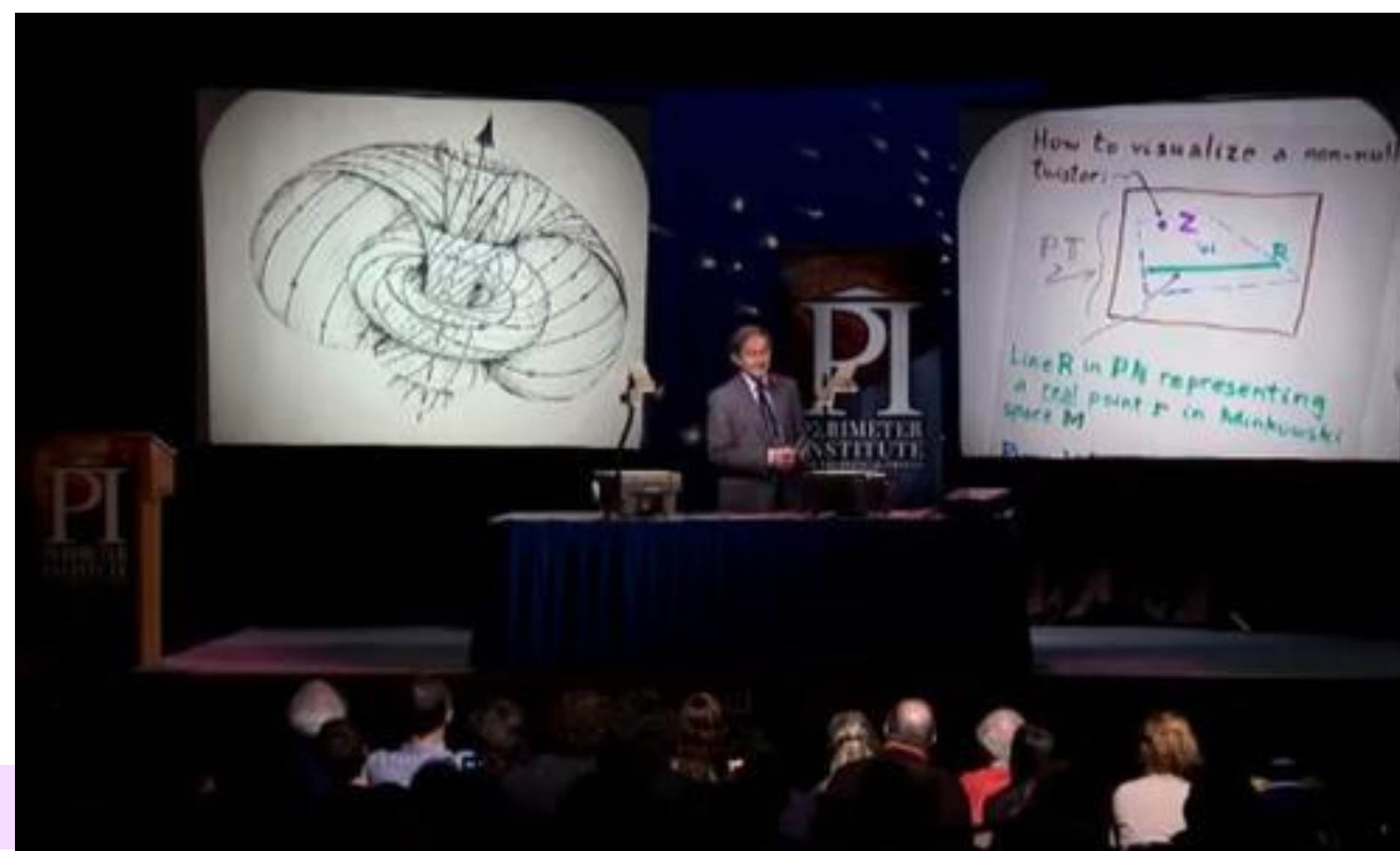
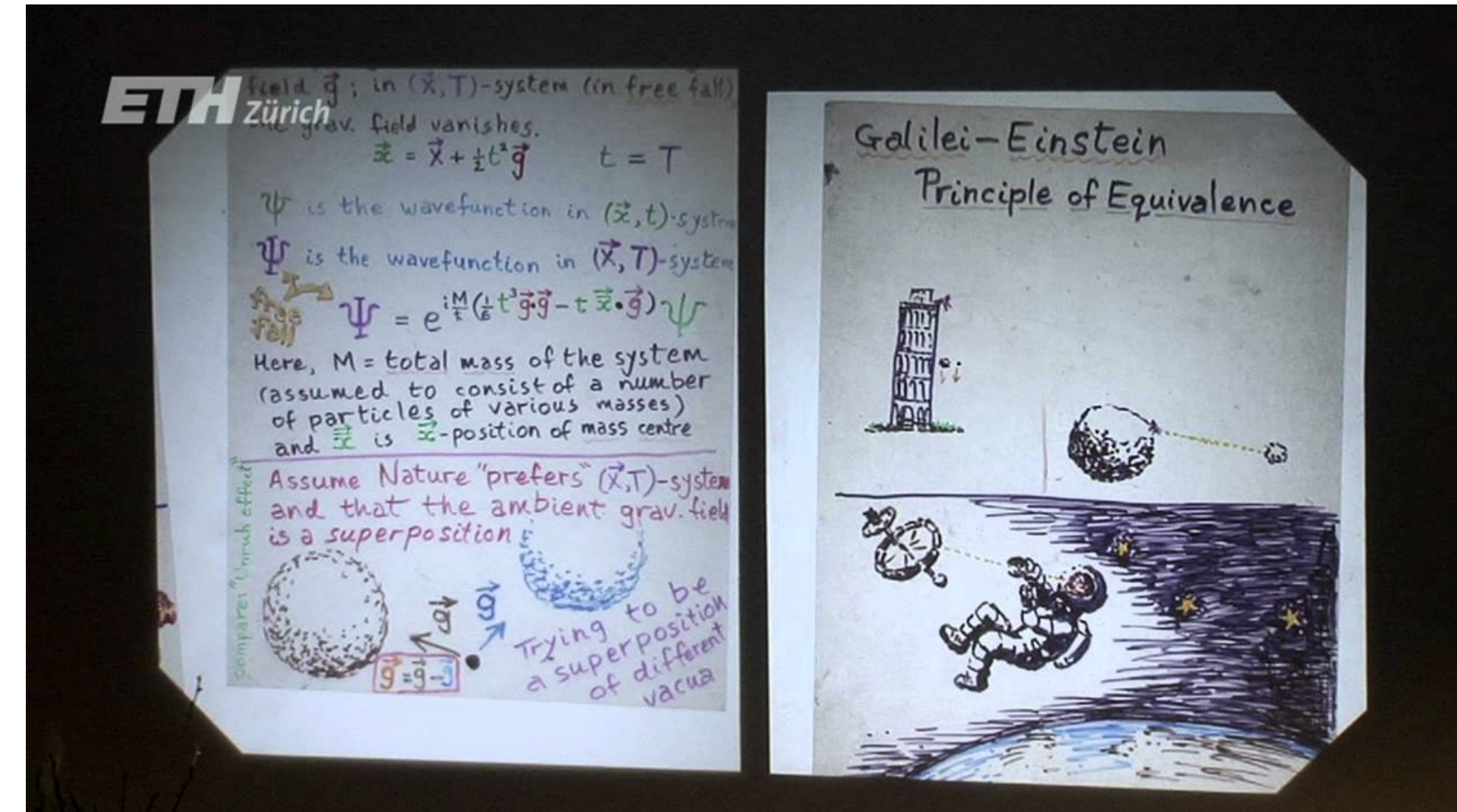
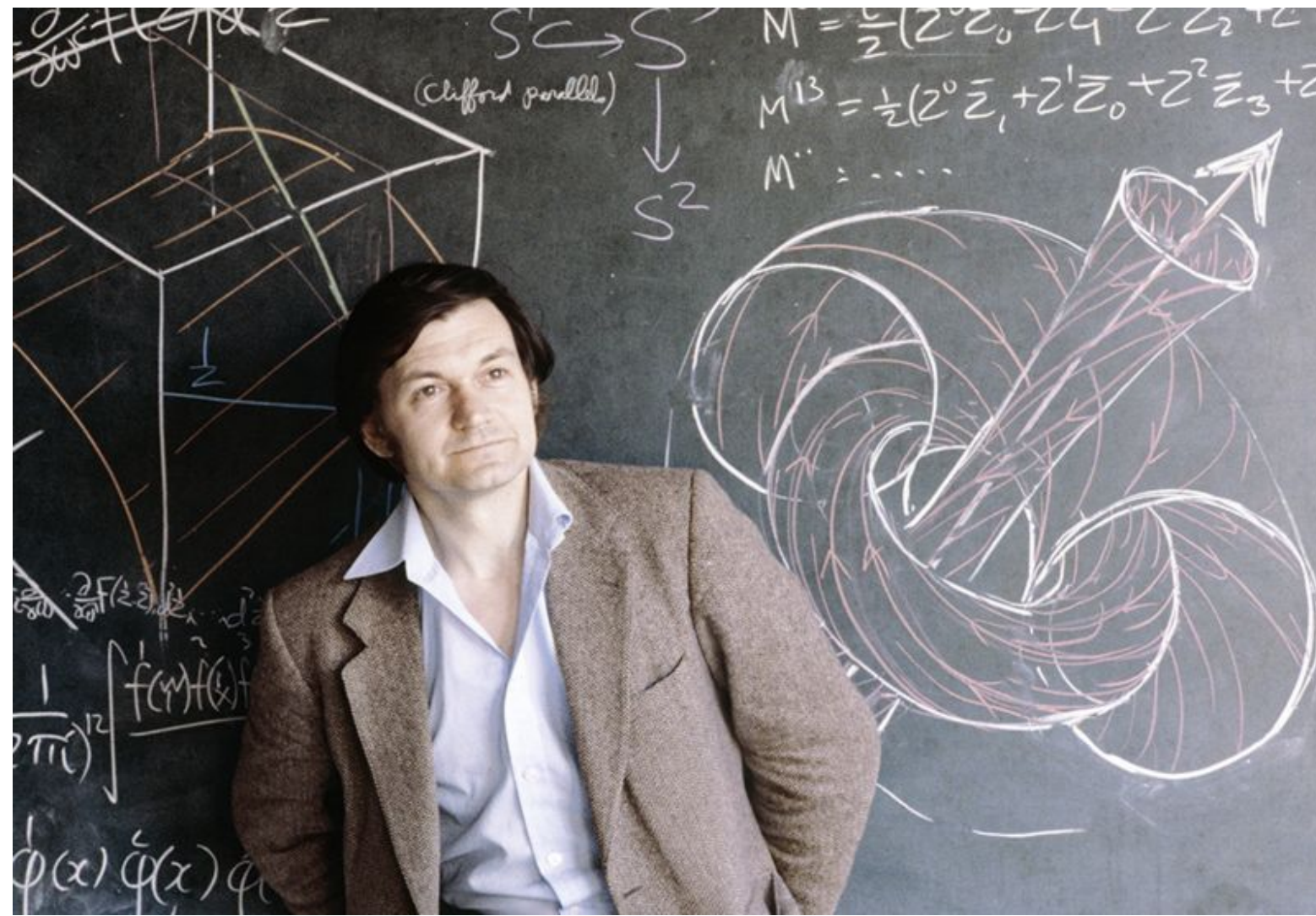


ペンローズが描いたブラックホール形成の図。横の広がりが空間（2次元で表している）、縦方向上向きに時間の進みを表す。物質が重力崩壊してつぶれ、光（円錐で描かれているのが光の広がり方を示す）が遠方へ到達しない領域が出現する。中心では特異点が発生するが、それはブラックホール境界面の内側にあるので、遠方の物理を乱さない。

(R. Penrose, Phys. Rev. Lett. 14 (1965) 57の図を加工。)

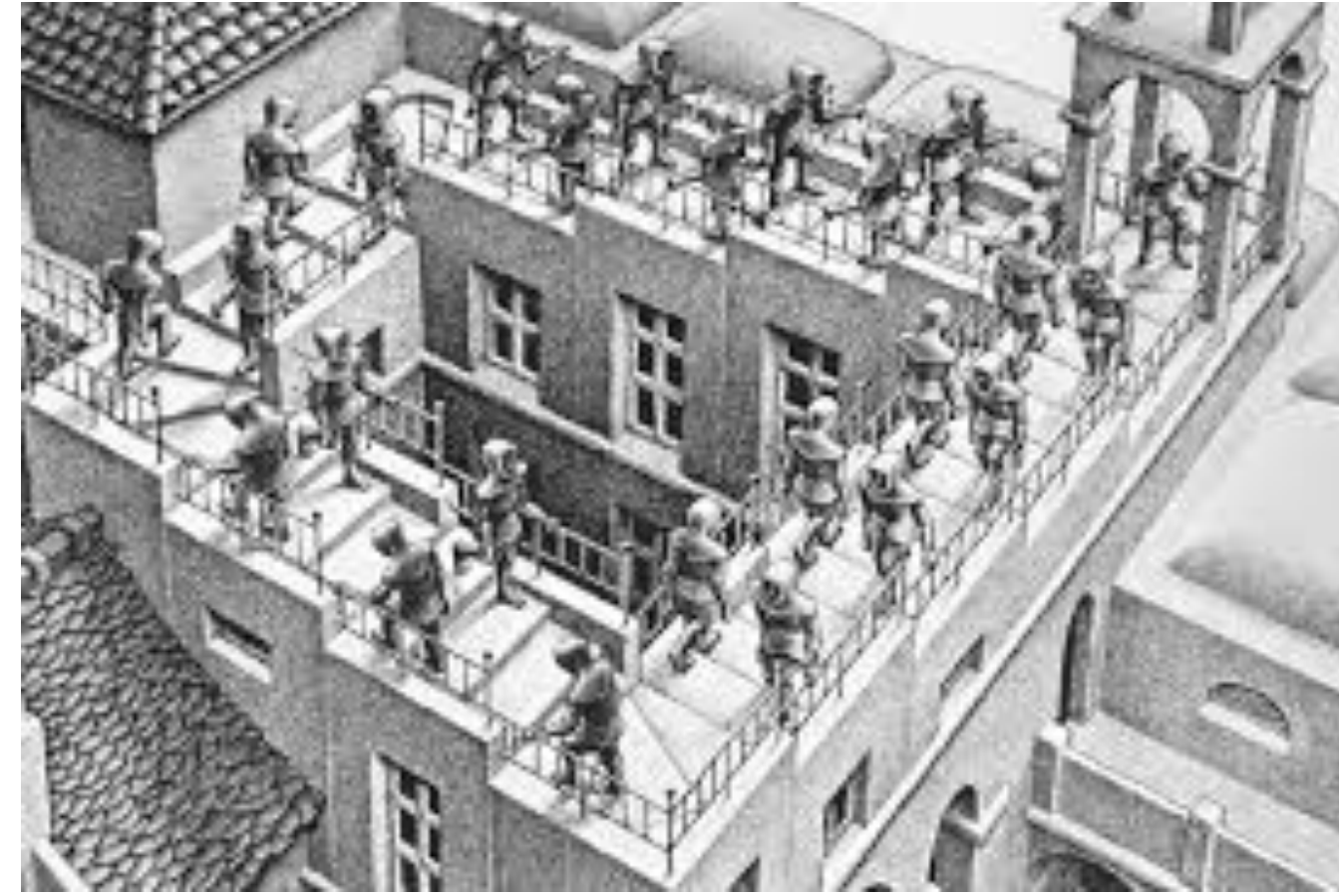


「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

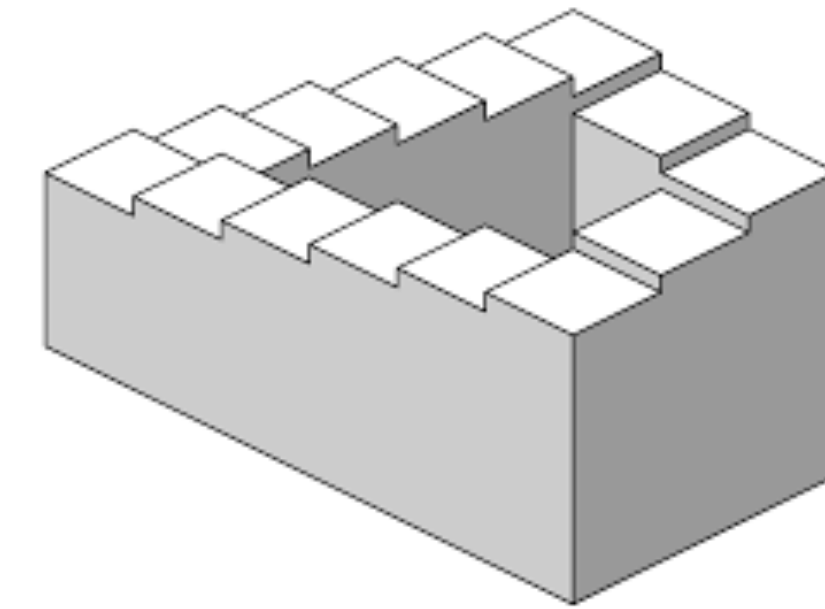




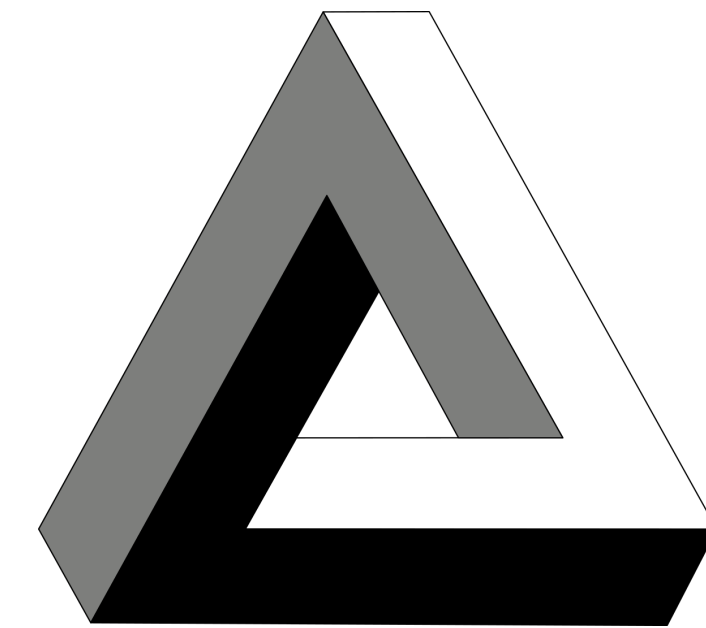
Ascending and Descending by M. C. Escher



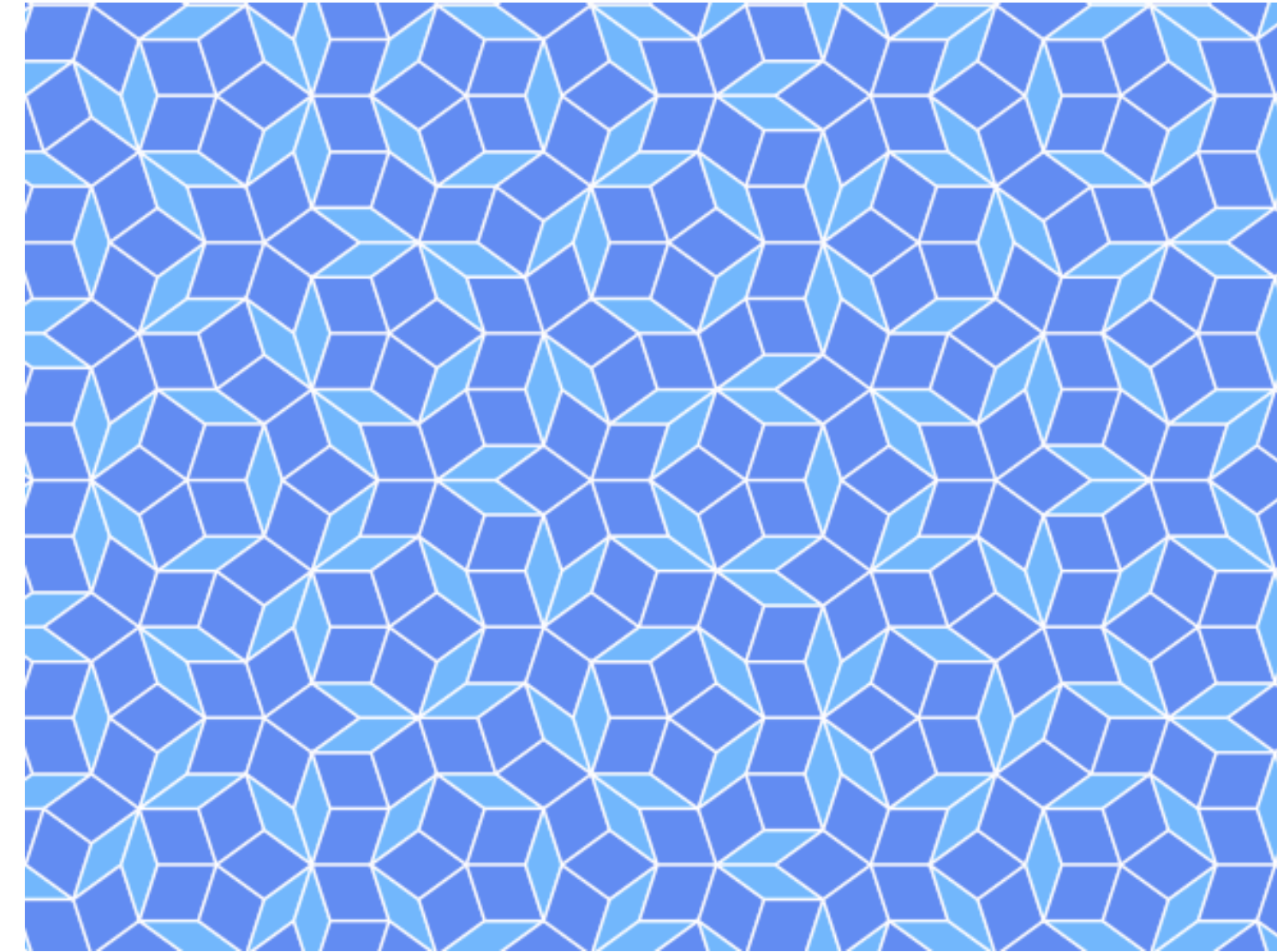
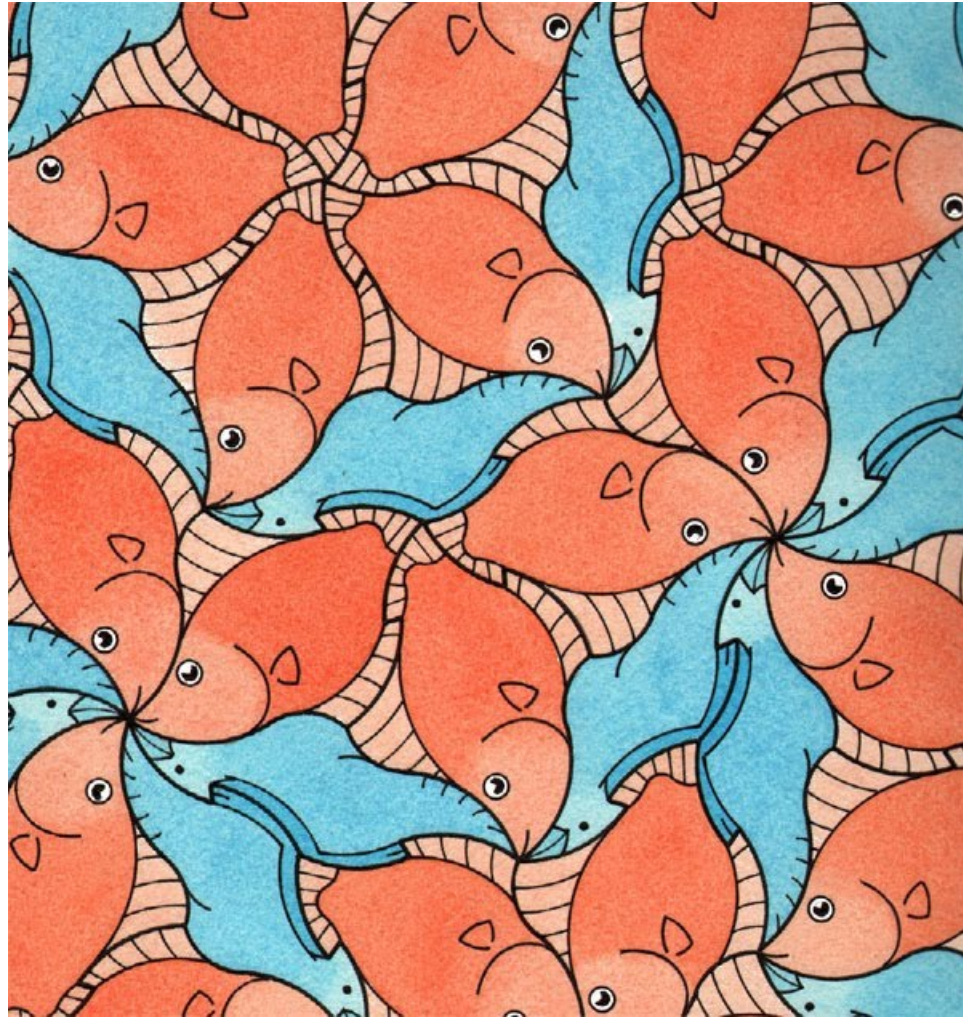
Relativity (1953) by M. C. Escher



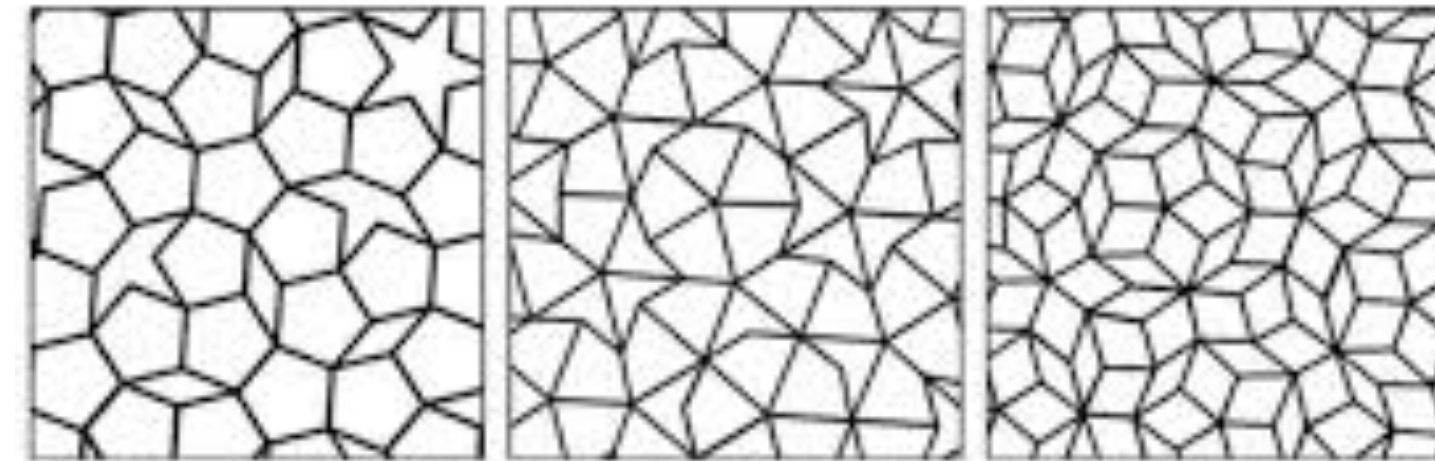
Penrose Stairs



Penrose Triangle



Penrose Tiling



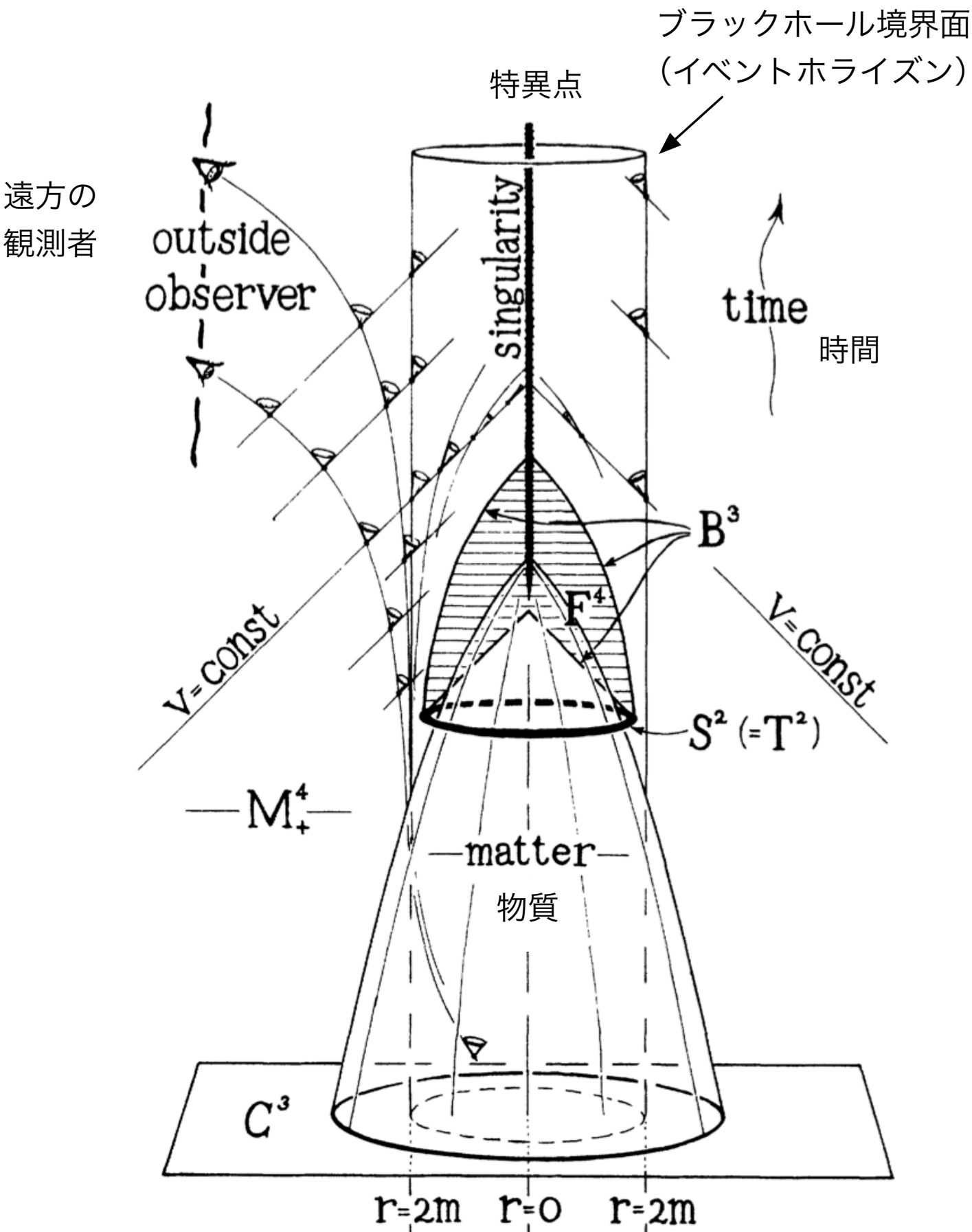
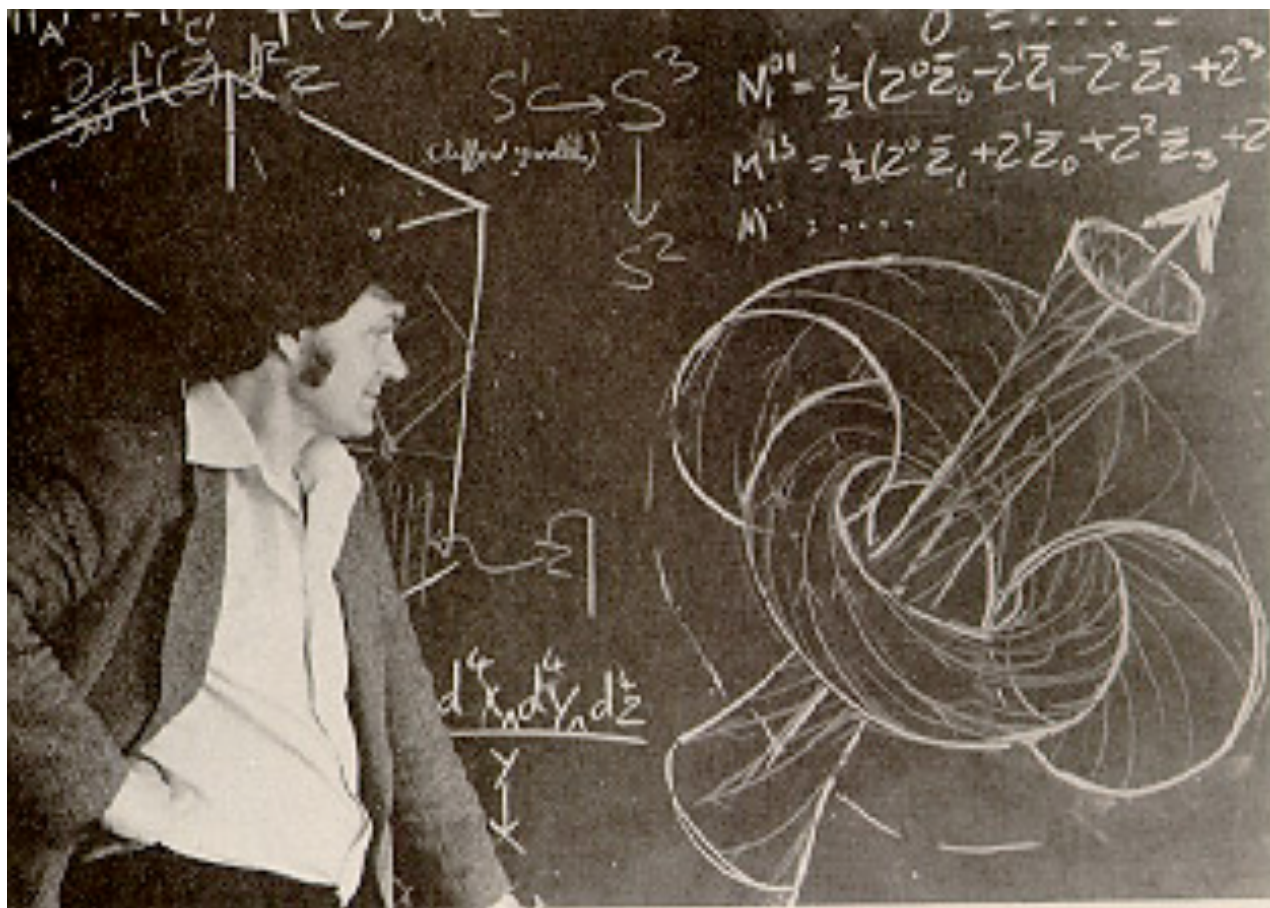
時空特異点(spacetime singularity)の問題

1960年代はじめまで

特異点を含む解が出てきたのは，球対称や軸対称の特殊な仮定をしたからでは？
現実には存在しない？

1965年 ペンローズ，特異点定理

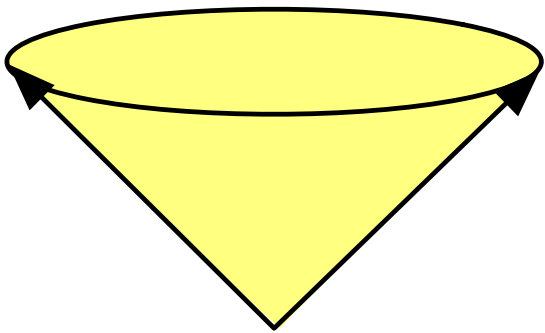
星が重力崩壊すれば，必ず特異点
が形成される。



特異点定理 (ペンローズ, 1965年)

ブラックホールの定義 = 光が無限遠まで届かない空間領域(事象の地平面の内側)

光円錐(light cone)

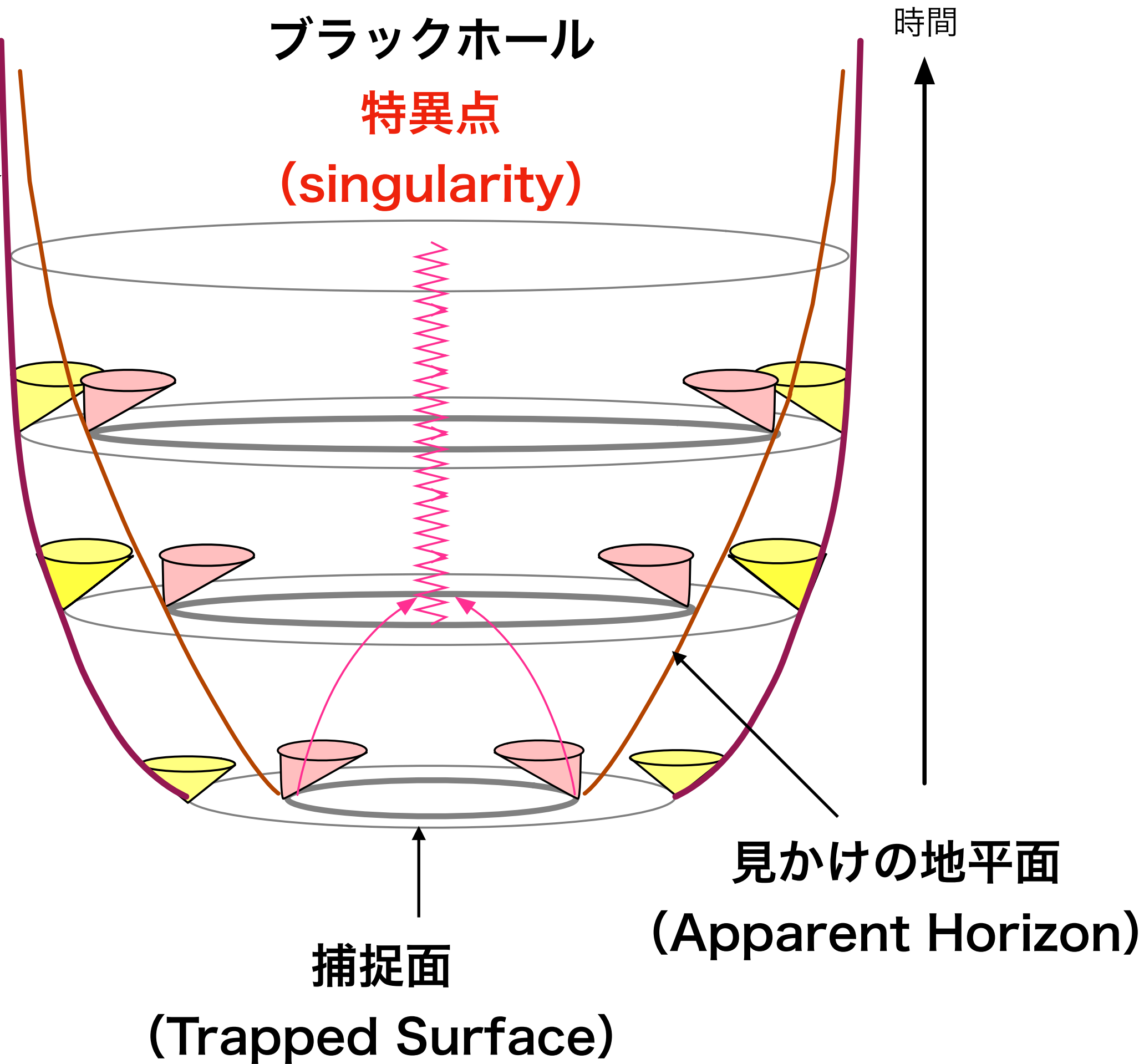


事象の地平面
(Event Horizon)

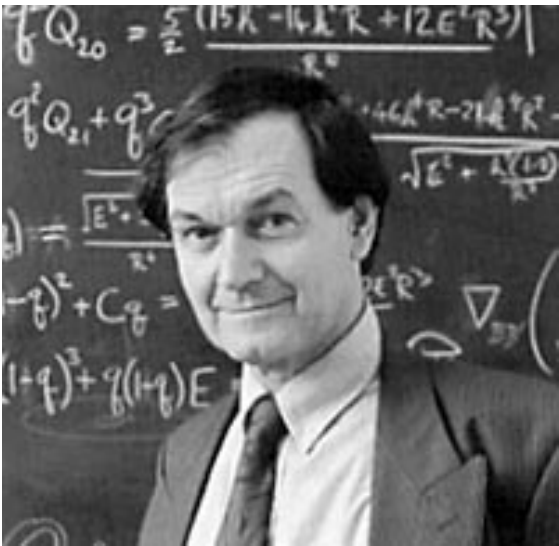
大域的に双曲的な漸近平坦時空において、
光的エネルギー条件が成立すれば、
捕捉面はブラックホール内部に含まれる

大域的に双曲的な漸近平坦時空が、
(1) 光的エネルギー条件が成立
(2) 宇宙が空間的に無限大
(3) 捕捉面が存在
の条件をみたせば、特異な測地線が存在する

時空の対称性に関係なく、特異点は形成される!



宇宙検閲官仮説（ペンローズ, 1969/79年）



特異点が発生すると，物理の議論ができなくなって困る。
特異点発生は，物理的に禁止されているのではないか？
cosmic censorship conjecture

弱い宇宙検閲官仮説 R. Penrose (1969)

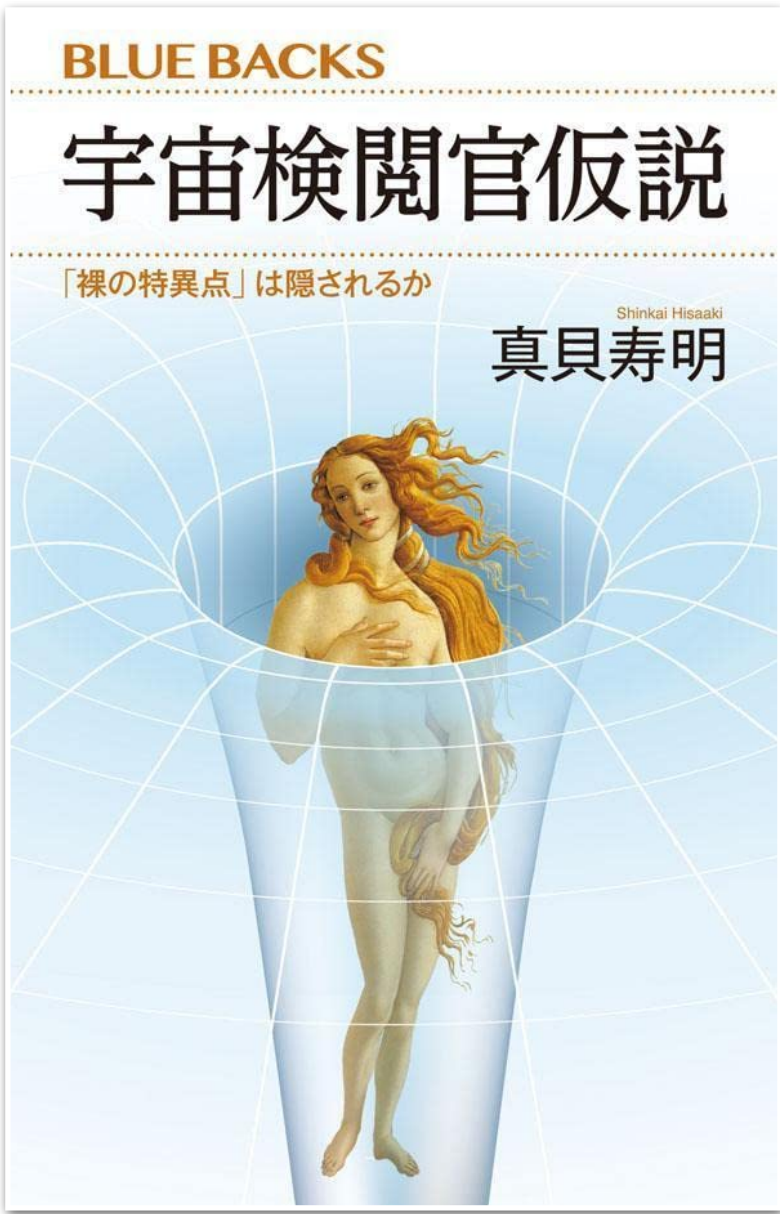
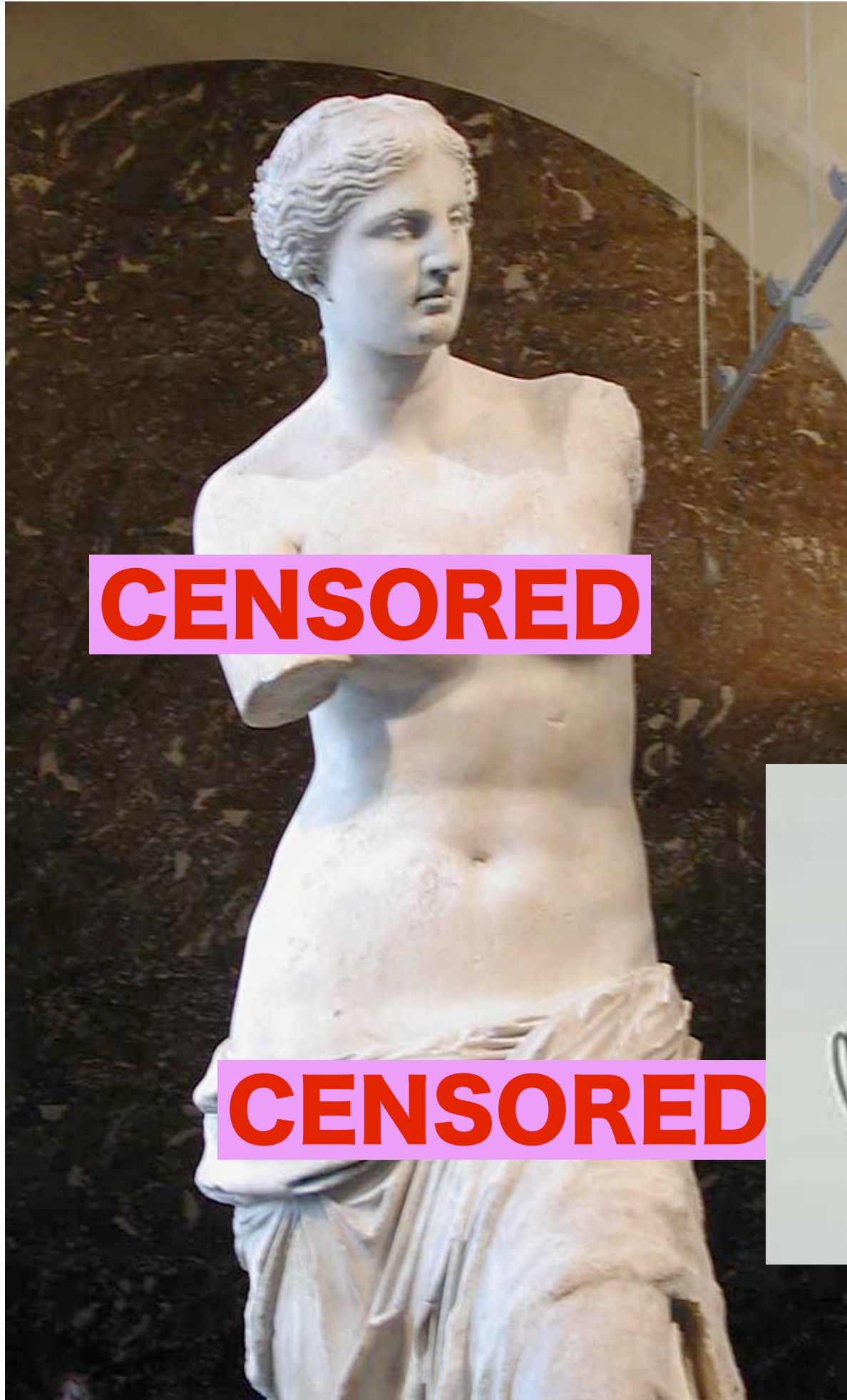
適切なエネルギー条件をみたす漸近平坦時空では，重力崩壊によって発生するすべての特異点は，ブラックホールの事象の地平面に覆われる。

「裸の特異点は，見えてはならない」

強い宇宙検閲官仮説 R. Penrose (1979)

適切なエネルギー条件をみたす漸近平坦時空では，裸の特異点は形成されない。

「裸の特異点は，存在しない」



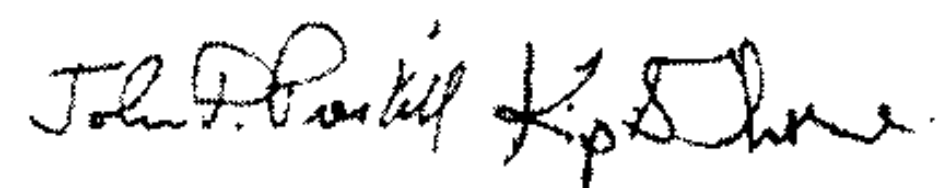
裸の特異点は存在するのか？（ホーキングvsソーンの賭け）

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.

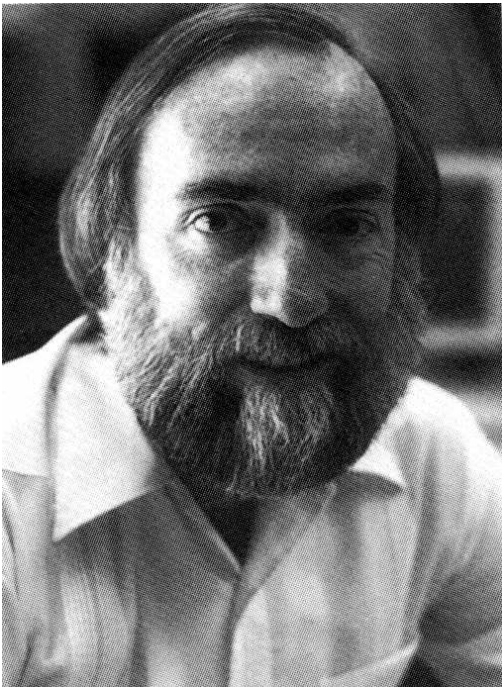


Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

ホーキング
「裸の特異点は物理法則によって
禁止されている」



ソーン, プレスキル
「あり得る」



敗者は裸体を覆う着物を勝者に
与えること

1991年9月24日

裸の特異点は出現する！

数値シミュレーションによる実例 (1991)

VOLUME 66, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

25 FEBRUARY 1991

Formation of Naked Singularities: The Violation of Cosmic Censorship

Stuart L. Shapiro and Saul A. Teukolsky

*Center for Radiophysics and Space Research and Departments of Astronomy and Physics,
Cornell University, Ithaca, New York 14853*

(Received 7 September 1990)

We use a new numerical code to evolve collisionless gas spheroids in full general relativity. In all cases the spheroids collapse to singularities. When the spheroids are sufficiently compact, the singularities are hidden inside black holes. However, when the spheroids are sufficiently large, there are no apparent horizons. These results lend support to the hoop conjecture and appear to demonstrate that naked singularities can form in asymptotically flat spacetimes.

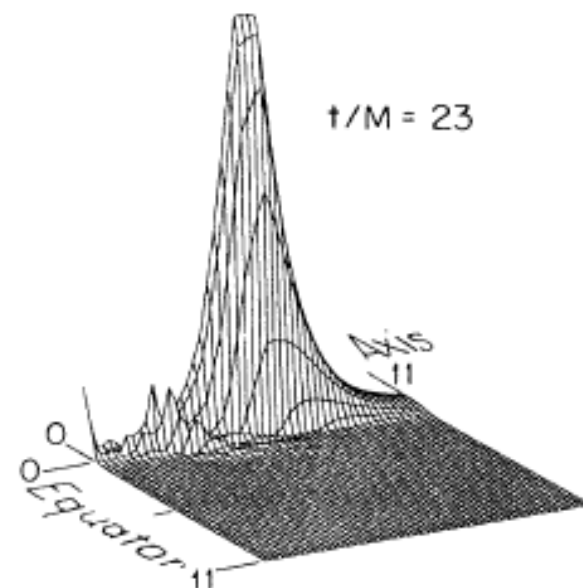
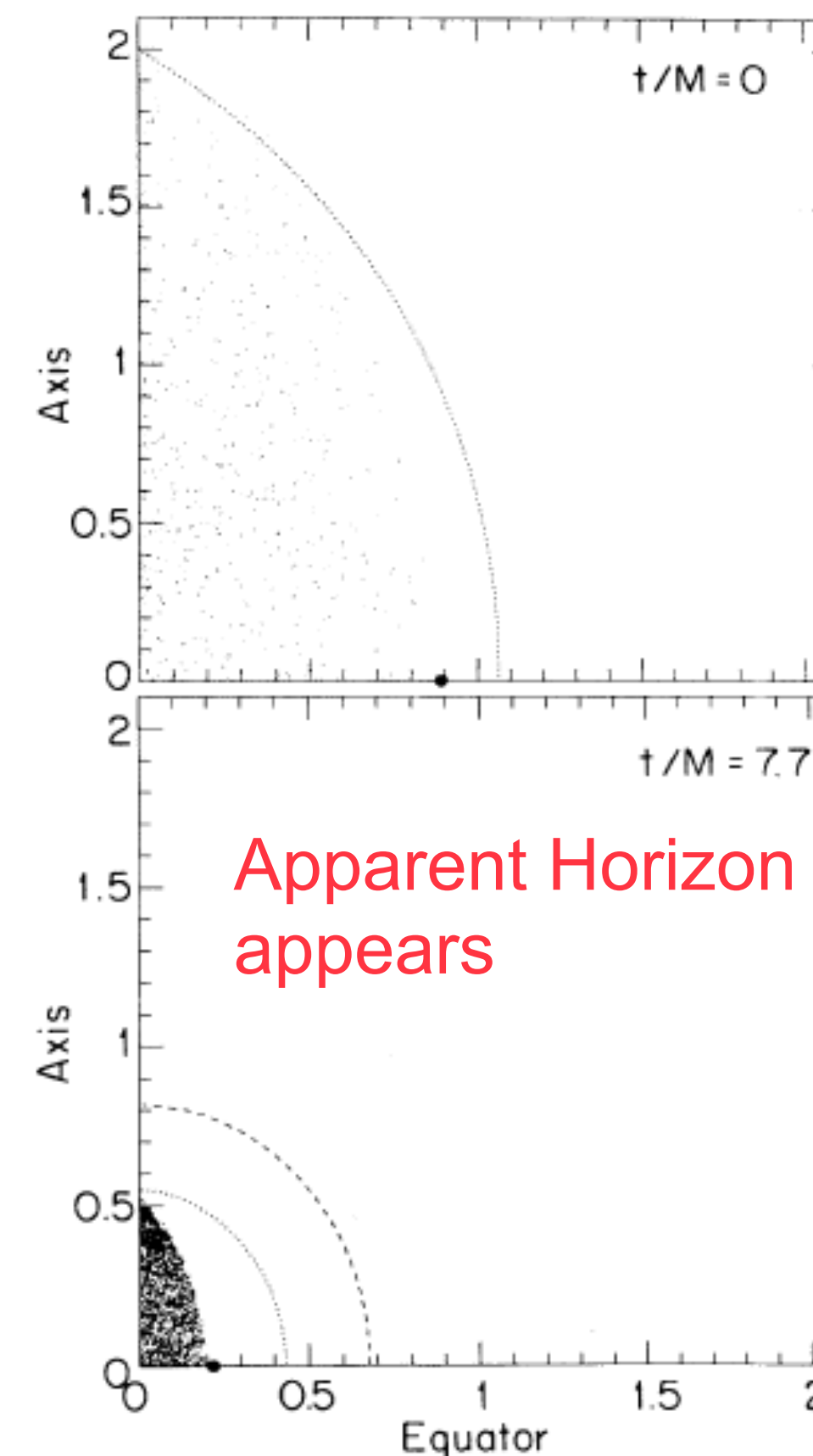
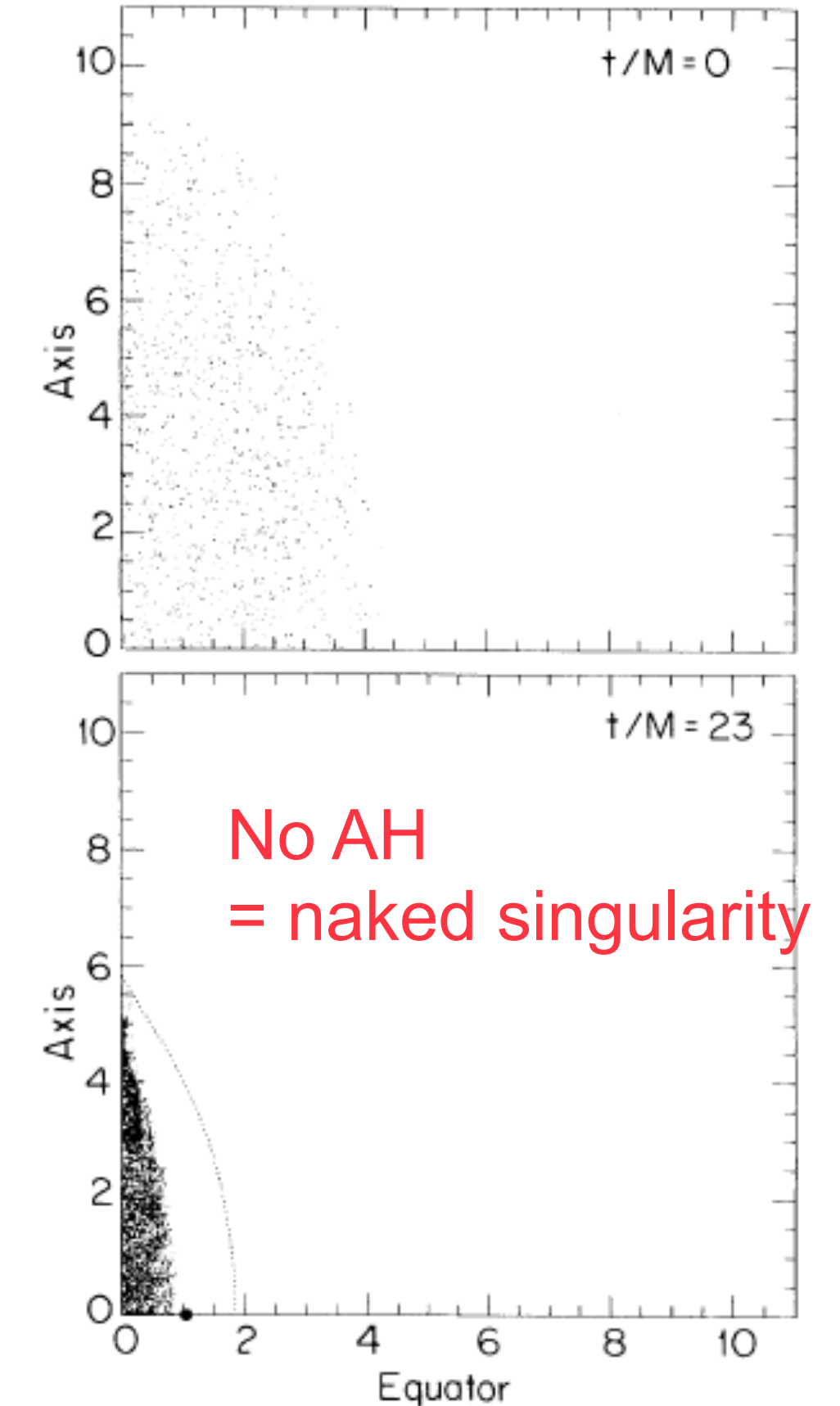


FIG. 4. Profile of I in a meridional plane for the collapse shown in Fig. 2. For the case of 32 angular zones shown here, the peak value of I is $24/M^4$ and occurs on the axis just outside the matter.

FIG. 1. Snapshots of the particle positions at initial and late times for prolate collapse. The positions (in units of M) are projected onto a meridional plane. Initially the semimajor axis of the spheroid is $2M$ and the eccentricity is 0.9. The collapse proceeds nonhomologously and terminates with the formation of a spindle singularity on the axis. However, an apparent horizon (dashed line) forms to cover the singularity. At $t/M=7.7$ its area is $\mathcal{A}/16\pi M^2=0.98$, close to the asymptotic theoretical limit of 1. Its polar and equatorial circumferences at that time are $\mathcal{C}_{\text{pole}}^{\text{AH}}/4\pi M=1.03$ and $\mathcal{C}_{\text{eq}}^{\text{AH}}/4\pi M=0.91$. At later times these circumferences become equal and approach the expected theoretical value 1. The minimum exterior polar circumference is shown by a dotted line when it does not coincide with the matter surface. Likewise, the minimum equatorial circumference, which is a circle, is indicated by a solid dot. Here $\mathcal{C}_{\text{eq}}^{\text{min}}/4\pi M=0.59$ and $\mathcal{C}_{\text{pole}}^{\text{min}}/4\pi M=0.99$. The formation of a black hole is thus consistent with the hoop conjecture.



Apparent Horizon
appears



No AH
= naked singularity

裸の特異点は出現する！

数値シミュレーションによる実例（2011）

PHYSICAL REVIEW D **83**, 064006 (2011)

Formation of naked singularities in five-dimensional space-time

Yuta Yamada^{1,*} and Hisa-aki Shinkai^{1,2,†}

¹*Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology,
1-79-1 Kitayama, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan*

²*Computational Astrophysics Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

(Received 18 December 2010; published 4 March 2011)

We numerically investigate the gravitational collapse of collisionless particles in spheroidal configurations both in four- and five-dimensional (5D) space-time. We repeat the simulation performed by Shapiro and Teukolsky (1991) that announced an appearance of a naked singularity, and also find similar results in the 5D version. That is, in a collapse of a highly prolate spindle, the Kretschmann invariant blows up outside the matter and no apparent horizon forms. We also find that the collapses in 5D proceed more rapidly than in 4D, and the critical prolateness for the appearance of an apparent horizon in 5D is loosened, compared to 4D cases. We also show how collapses differ with spatial symmetries comparing 5D evolutions in single-axisymmetry, $SO(3)$, and those in double-axisymmetry, $U(1) \times U(1)$.

DOI: [10.1103/PhysRevD.83.064006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.064006)

PACS numbers: 04.20.Dw, 04.20.Ex, 04.25.dc, 04.50.Gh

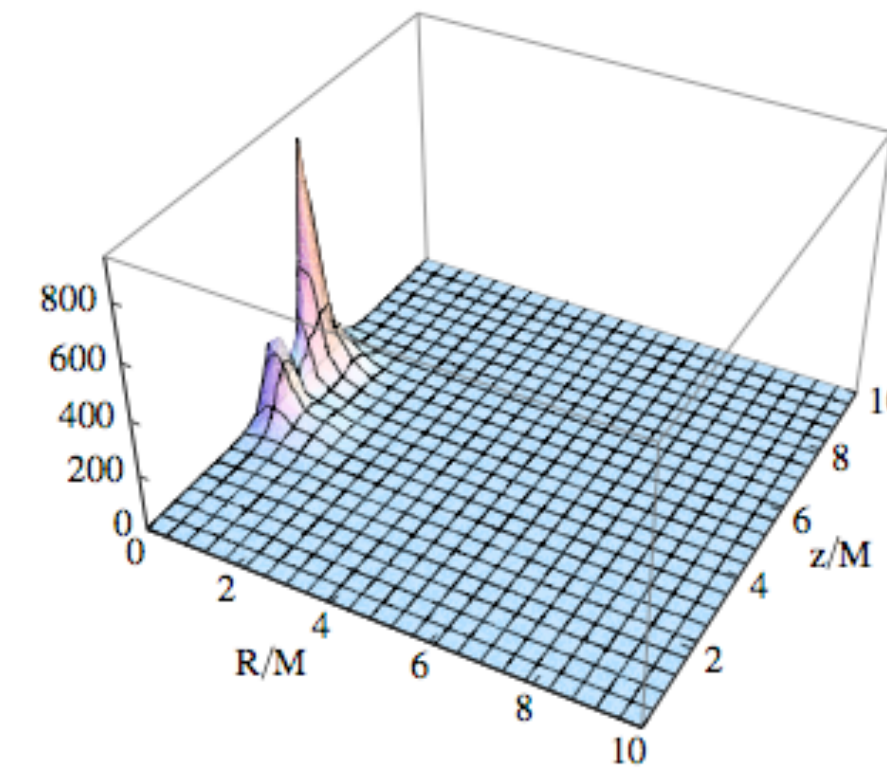


FIG. 3 (color online). Kretschmann invariant I for model 5DS δ at $t/M = 15.4$. The maximum is $O(1000)$, and its location is on z -axis, just outside of the matter.

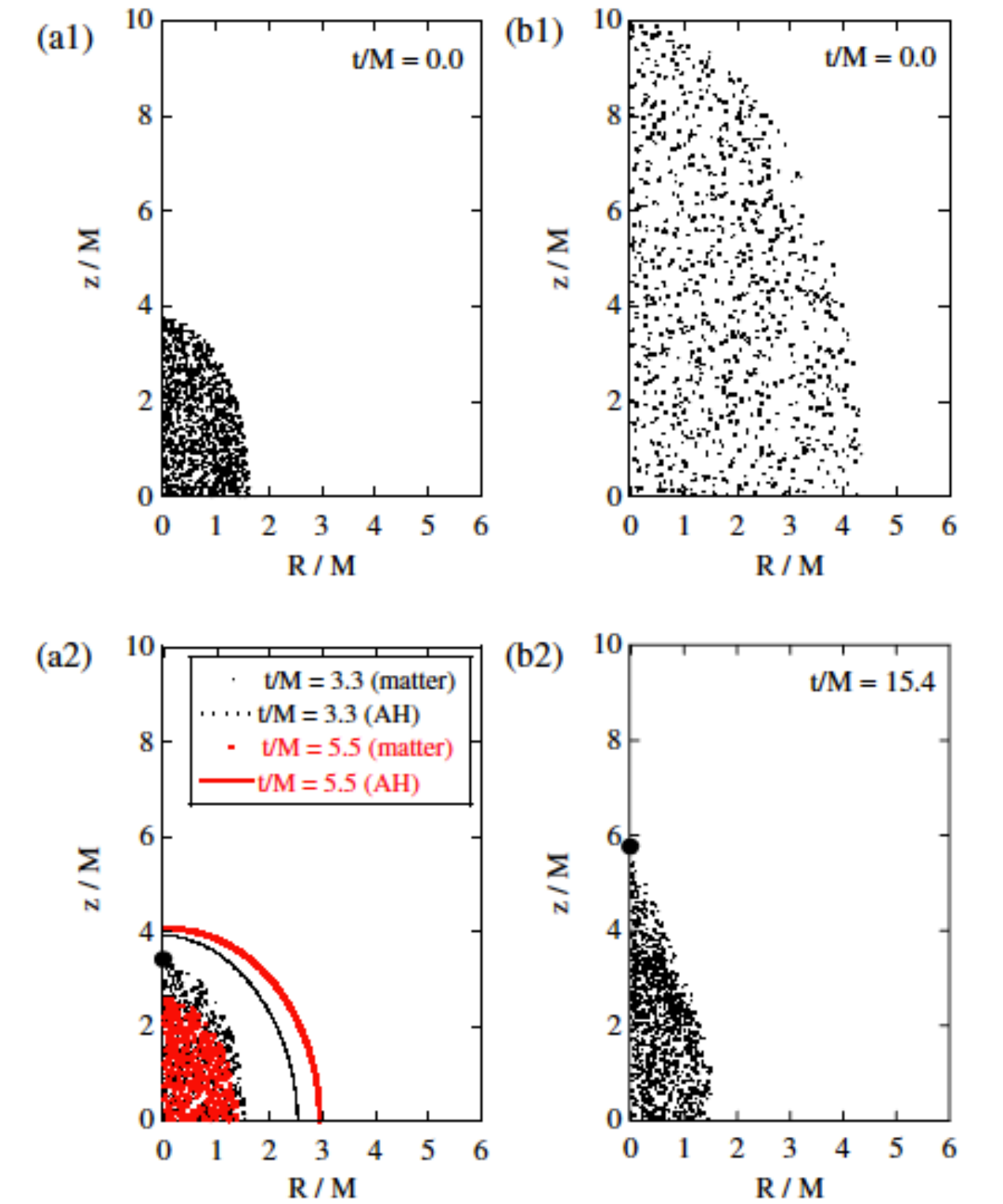


FIG. 2 (color online). Snapshots of 5D axisymmetric evolution with the initial matter distribution of $b/M = 4$ [(a1) and (a2); model 5DS β in Table I] and 10 [(b1) and (b2); model 5DS δ]. We see the apparent horizon (AH) is formed at the coordinate time $t/M = 3.3$ for the former model and the area of AH increases, while AH is not observed for the latter model up to the time $t/M = 15.4$, when our code stops due to the large curvature. The big circle indicates the location of the maximum Kretschmann invariant $I_{\max}$ at the final time at each evolution. Number of particles are reduced to 1/10 for figures.

裸の特異点は存在するのか？（ホーキングvsソーンの賭け ver2）

Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

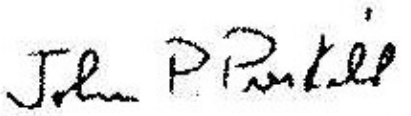
And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions (i.e., from an open set of initial data) can never produce a naked singularity (a past-incomplete null geodesic from $\mathcal{I}_+$).

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

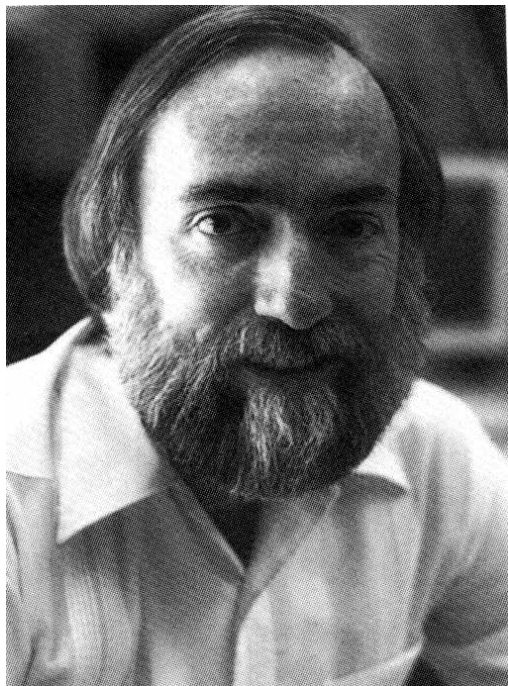
 Stephen W. Hawking   John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, California, 5 February 1997

ホーキング
「一般的な初期条件では、裸の特異点は発生しない」



ソーン, プレスキル
「あり得る」



敗者は裸体を覆う着物を勝者に与え、その着物には敗北を認める文章を入れること。

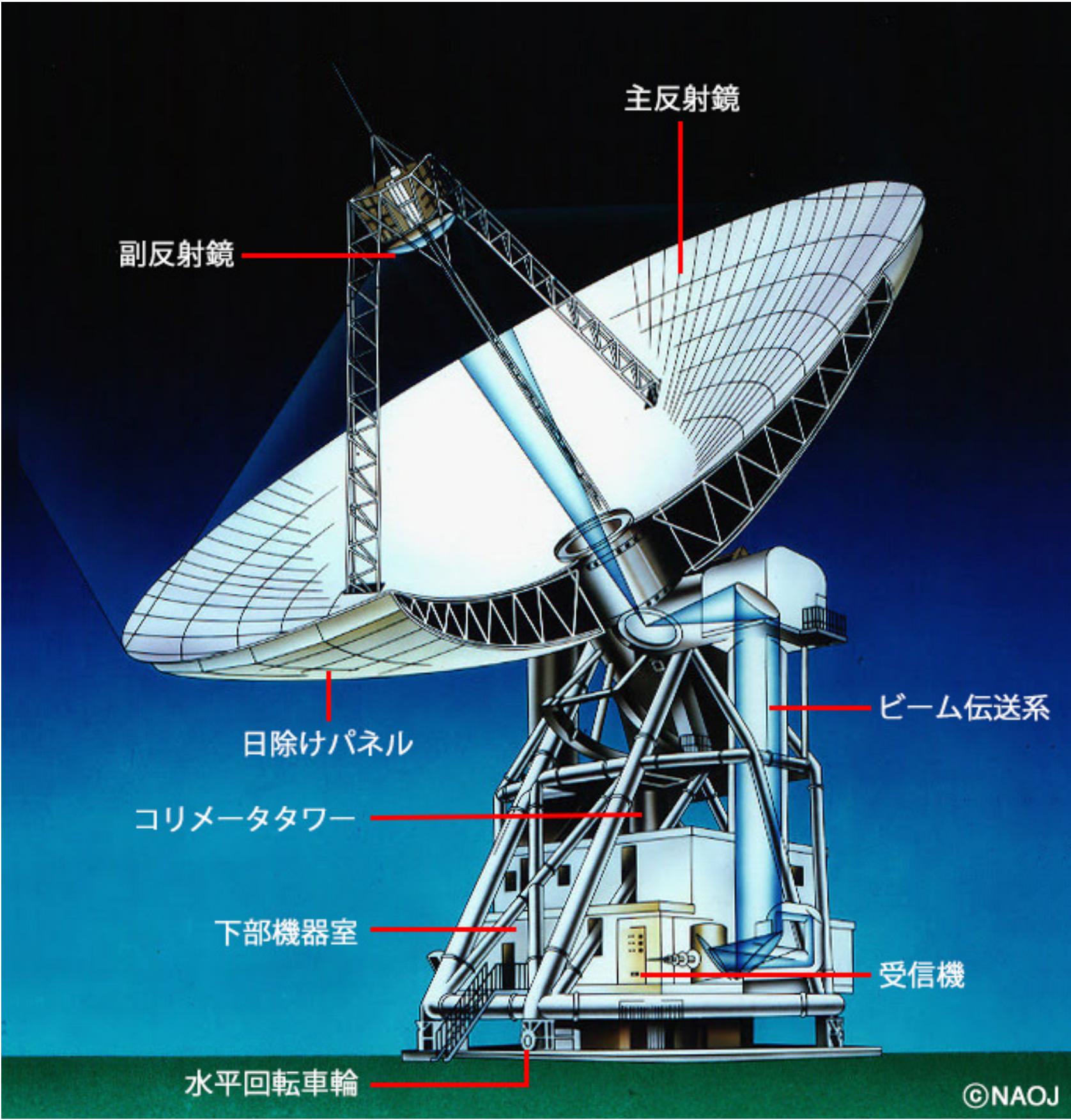
1997年2月5日

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



地球から5500万光年

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

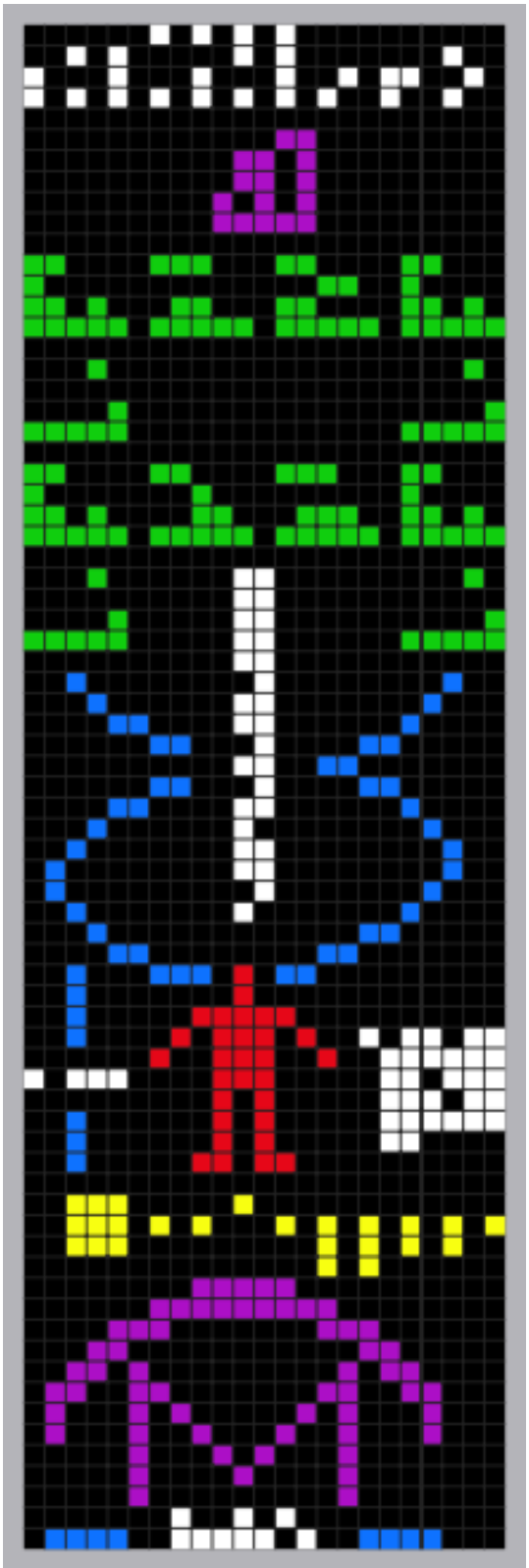


分解能＝波長/口径

野辺山45m望遠鏡

アレシボ電波望遠鏡 305メートル球面電波望遠鏡(1963ー)

(Arecibo Observatory, プエルトリコ)



- 1964 水星の自転周期55日の発見
- 1968 かにパルサー中心に中性子星発見
- 1974 連星中性子星発見
- 1989 小惑星カスタリア直接観測
- 1992 パルサーを公転する太陽系外惑星発見

アレシボ・メッセージ (1974)
SETI (1999ー)

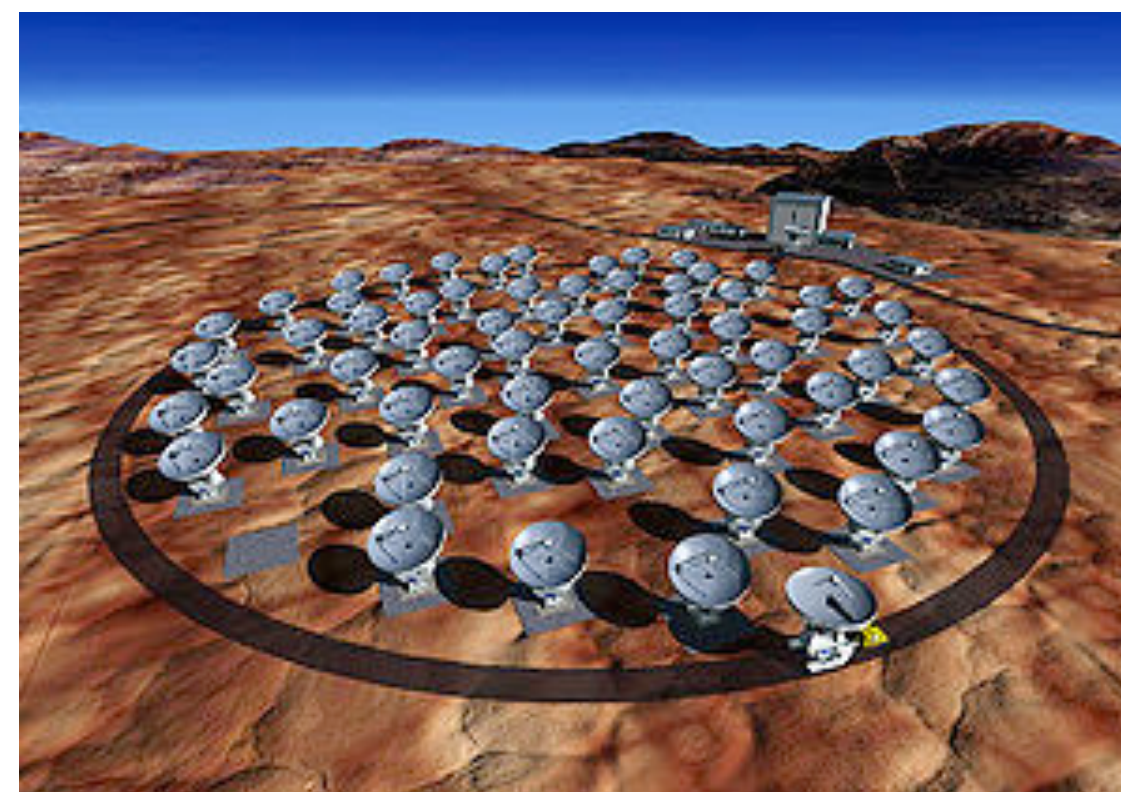
日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

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

直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる。最大18.5キロメートルまでアンテナ間隔を広げることができ、最大の空間分解能は、0.05 マイクロラジアン。



「大阪にある一円玉を東京から見分けられるほどの高い解像度」



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

中国 天眼(FAST) 500メートル球面電波望遠鏡(2016一)

(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST)

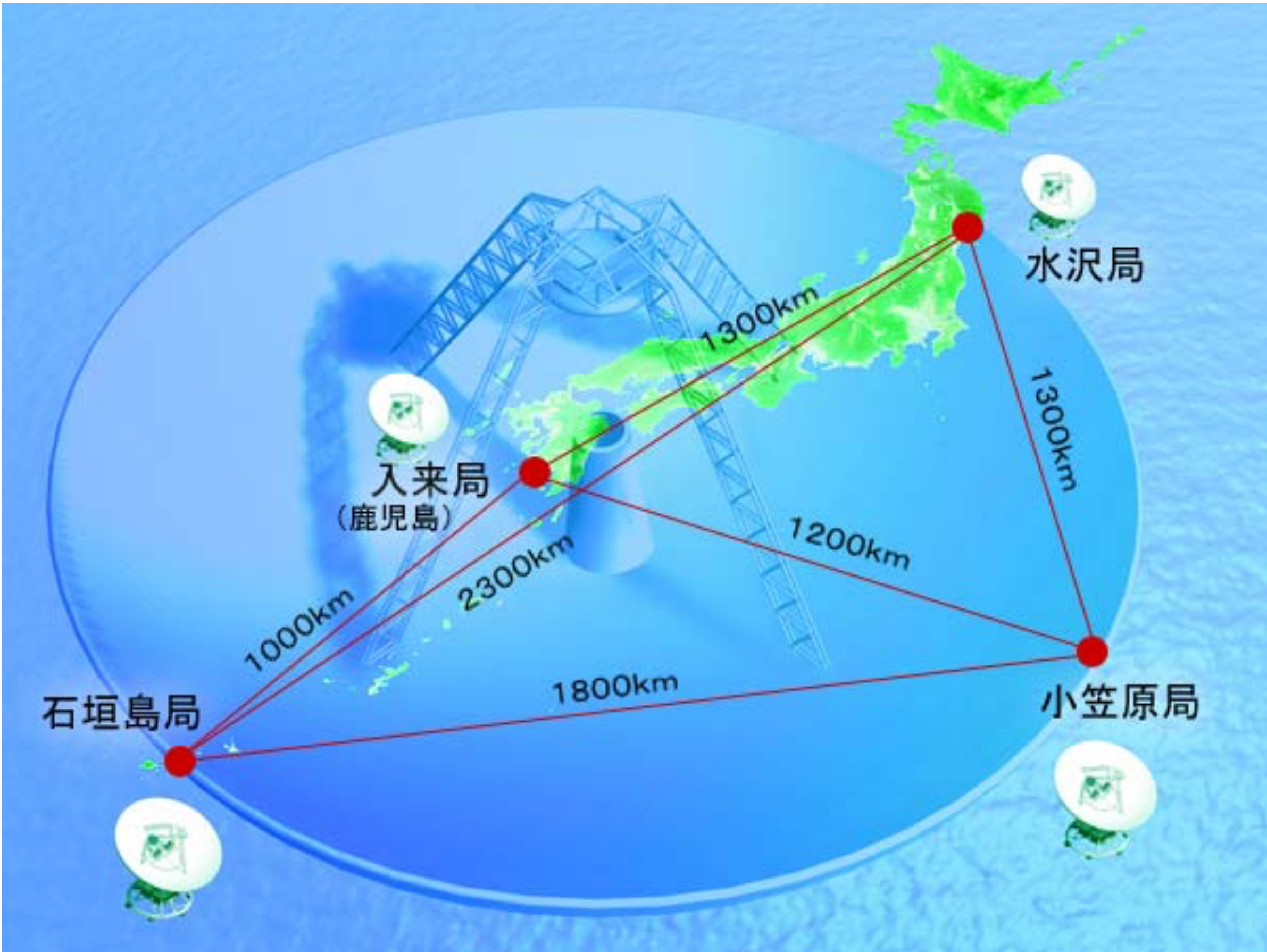


中国南西部の貴州省, 185億円, 天頂から40度の範囲を観測可能,
1 万人強制移住, 半径 5 km以内携帯電話禁止

電波干渉計



VLBI = Very Long Baseline Interferometer
VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html>

Event Horizon Telescope





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

The Event Horizon Telescope Collaboration

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

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

Abstract

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

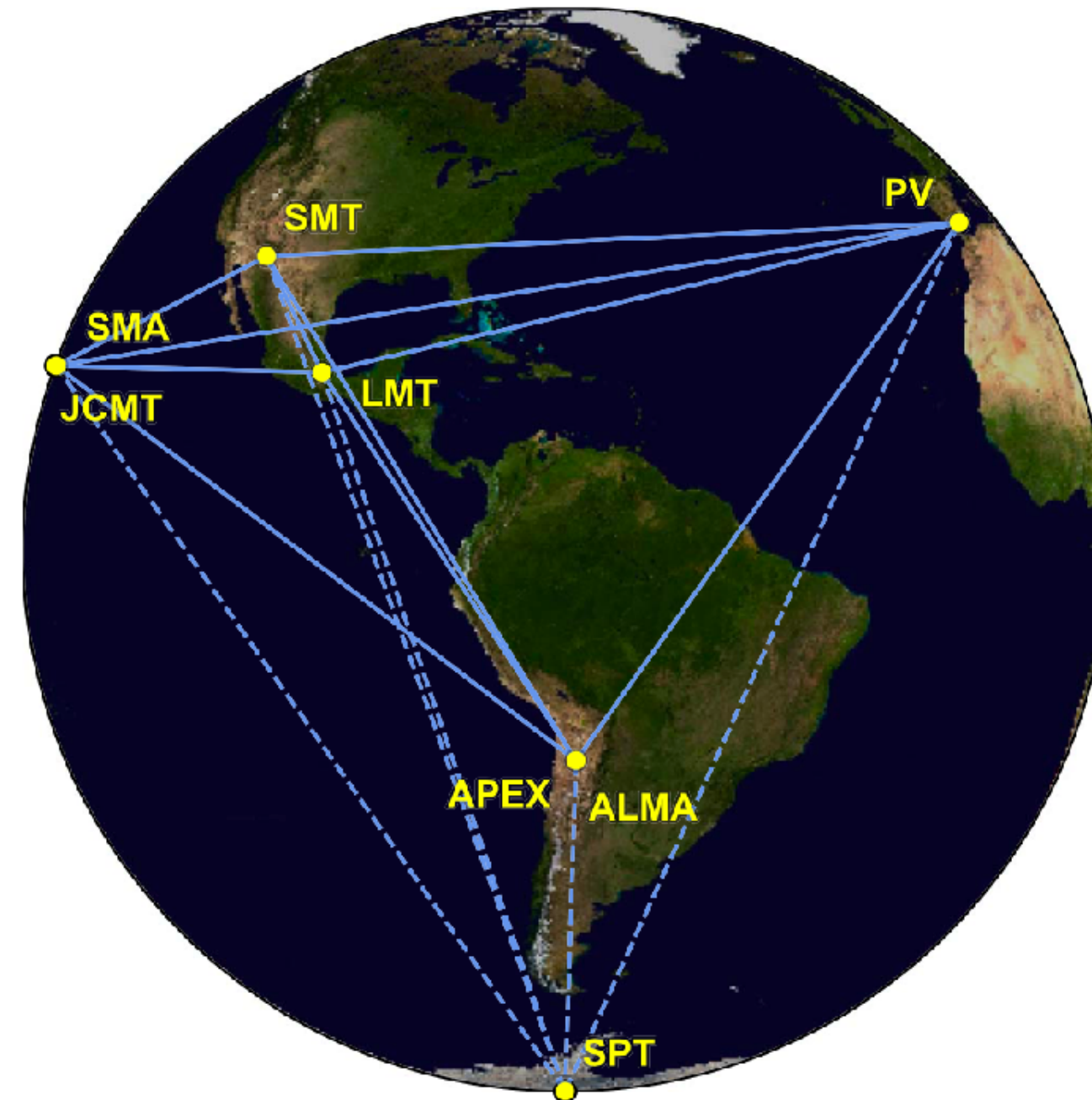


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

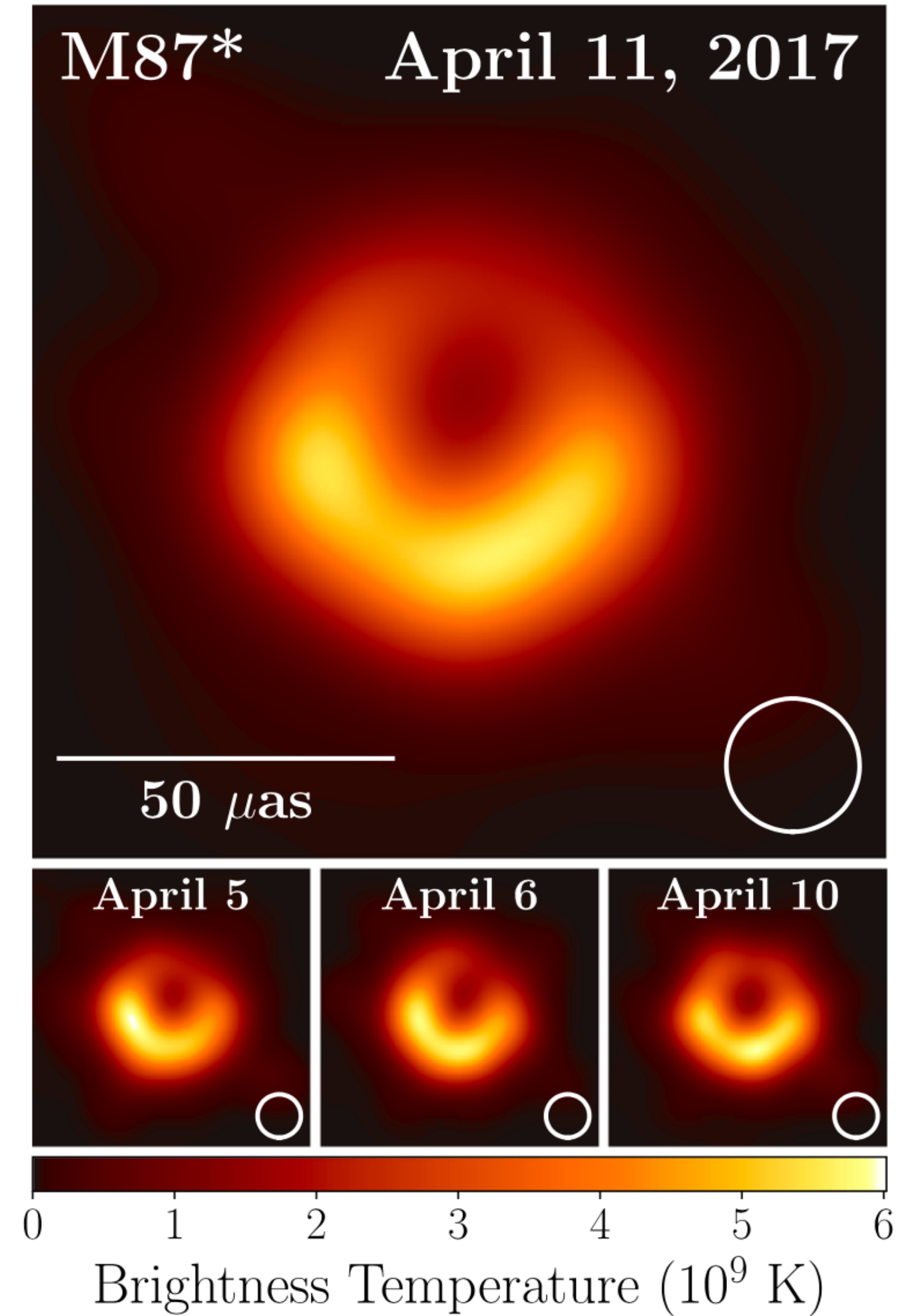


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels ($20 \mu\text{as}$ FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature, $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$, where S is the flux density, λ is the observing wavelength, k_B is the Boltzmann constant, and Ω is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像



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

0'58"

2022年5月12日,「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 930:L17 (44pp), 2022 May 10
© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.
OPEN ACCESS

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



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

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

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

Abstract

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

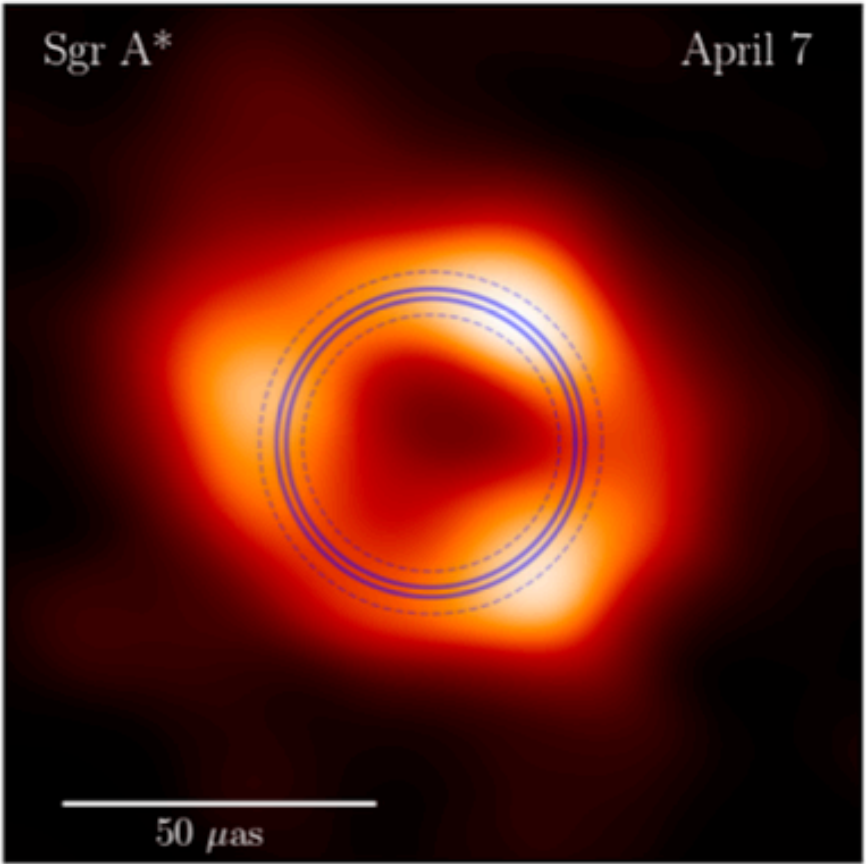
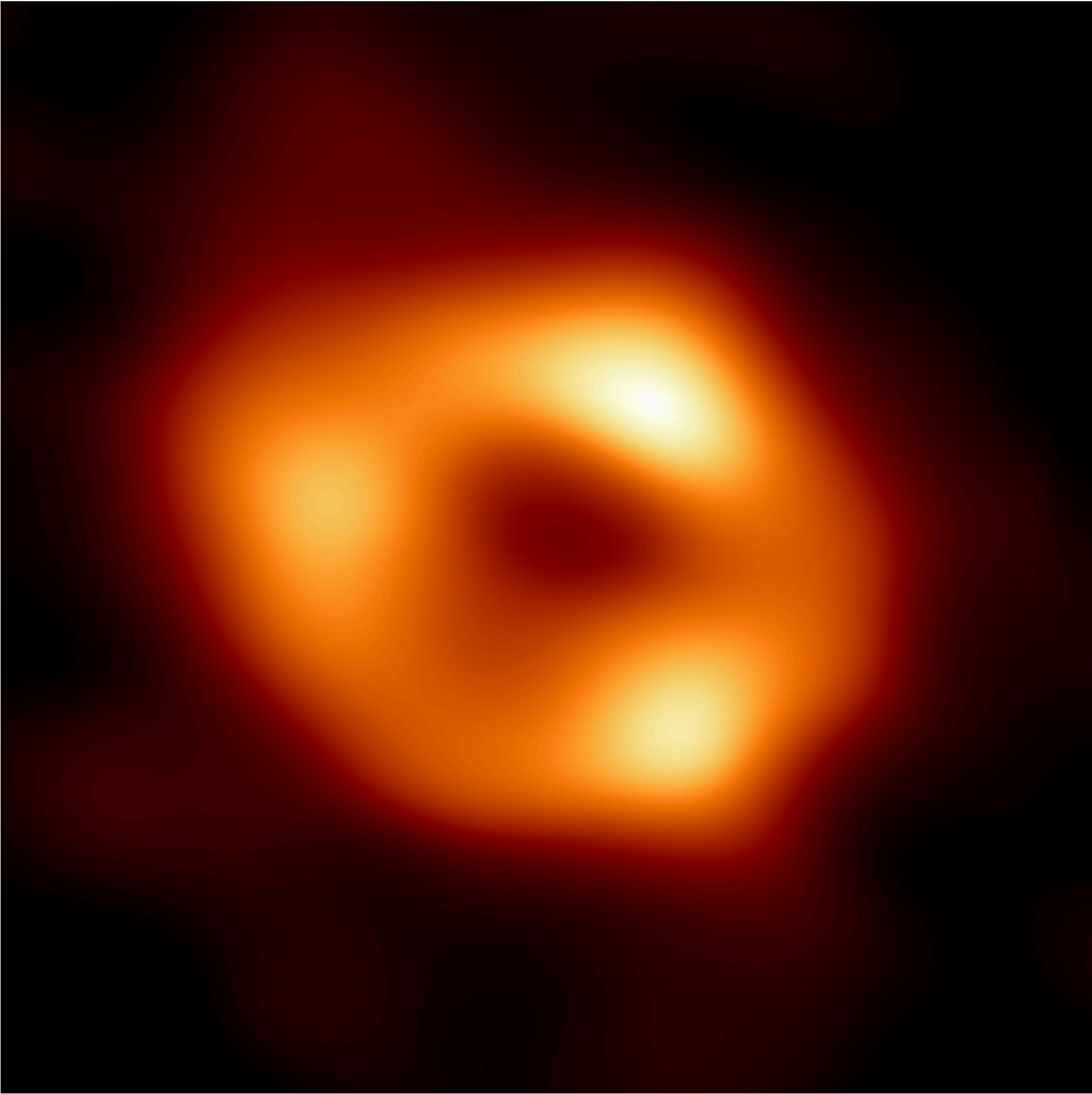


Figure 11. Inferred diameter of the black hole shadow boundary overlaid on the average EHT image of Sgr A* obtained from the 2017 April 7 data. Solid lines show the range of most likely values, while the dashed lines show the envelope of the 68th percentile credible intervals for all methods.



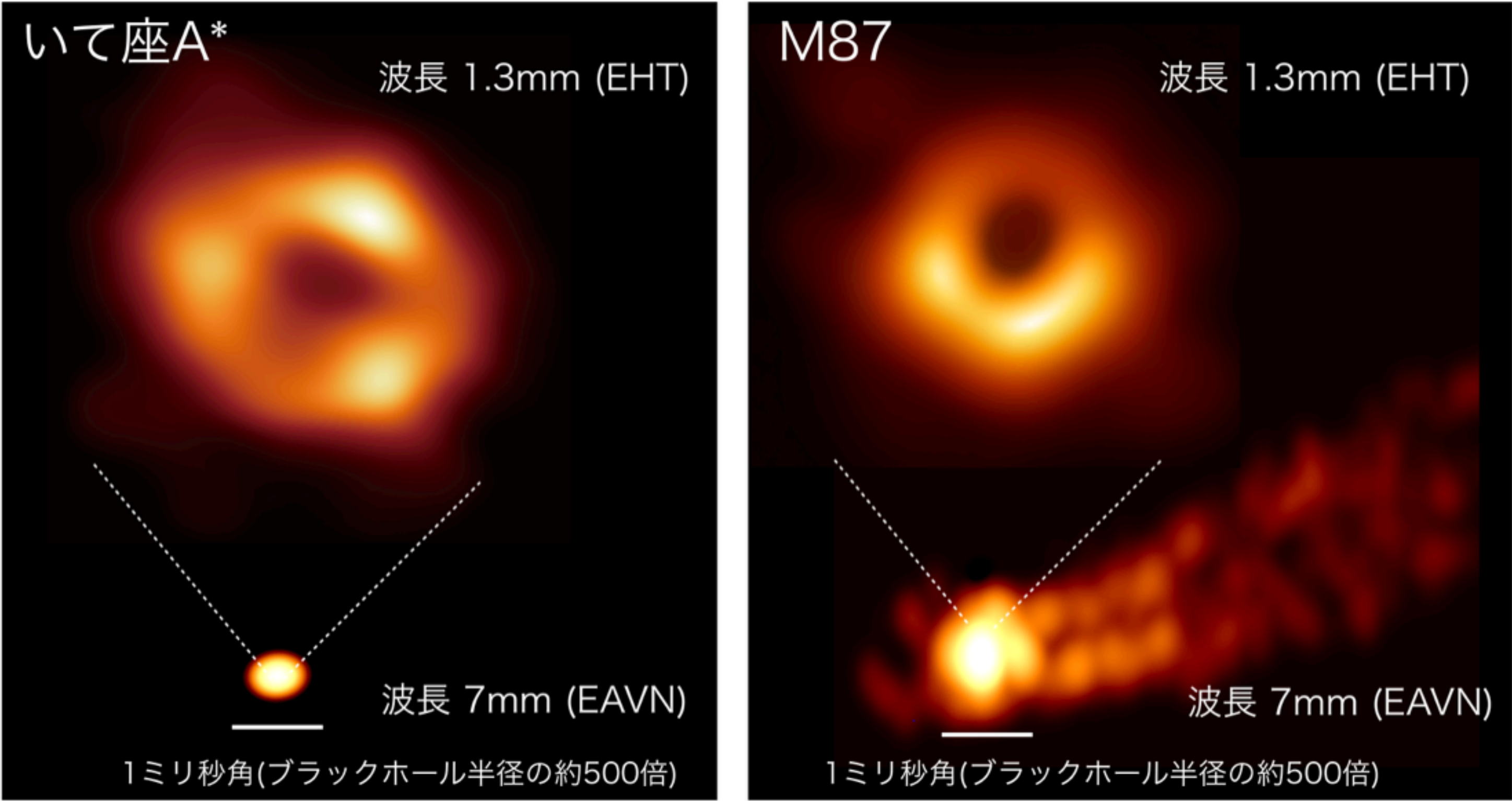
地球から2万8000光年

<https://eventhorizontelescope.org>

2022年5月12日,「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

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

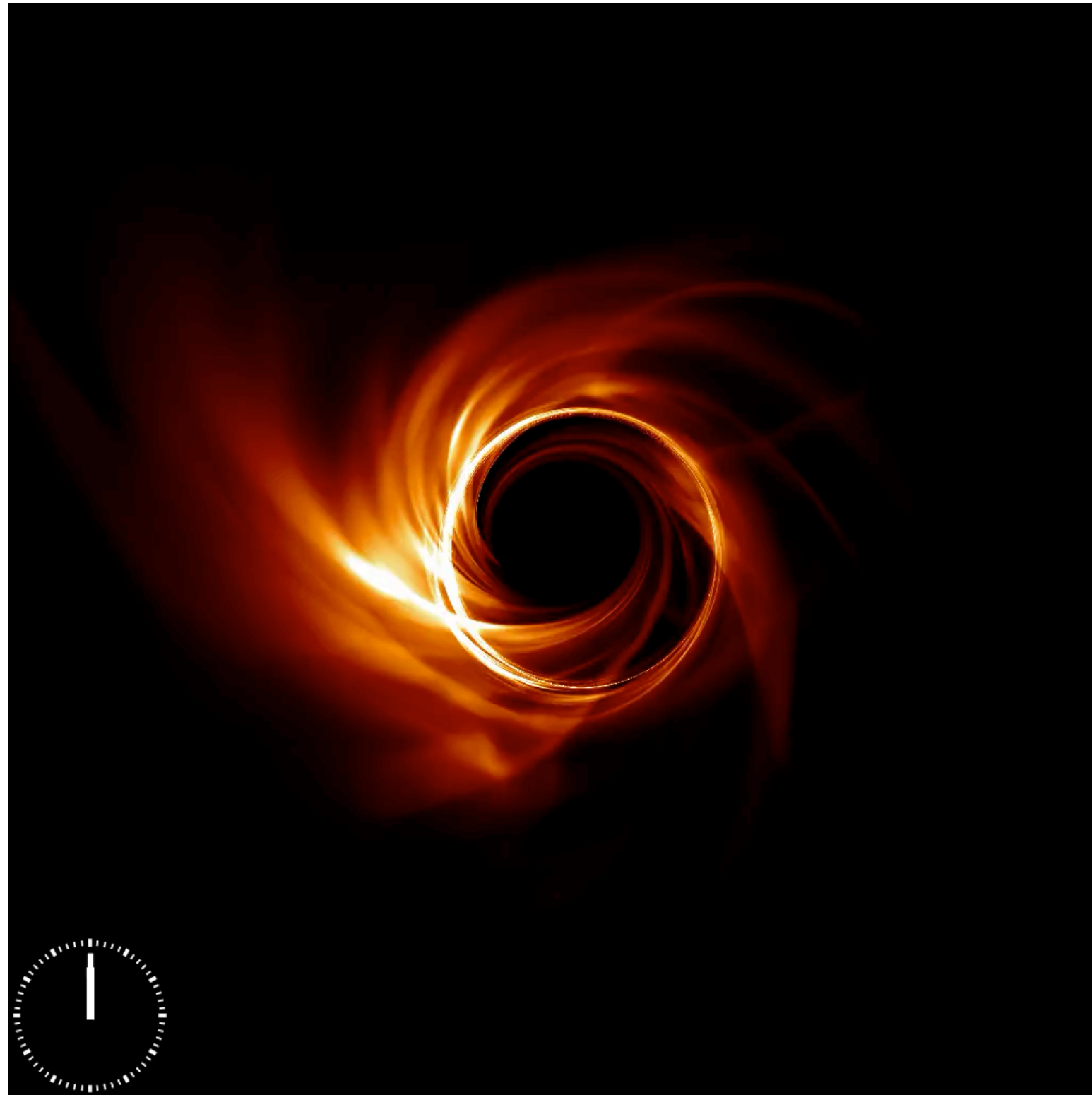
3桁大きなBHが
3桁遠くにいるので、
同じ位の大きさに見える



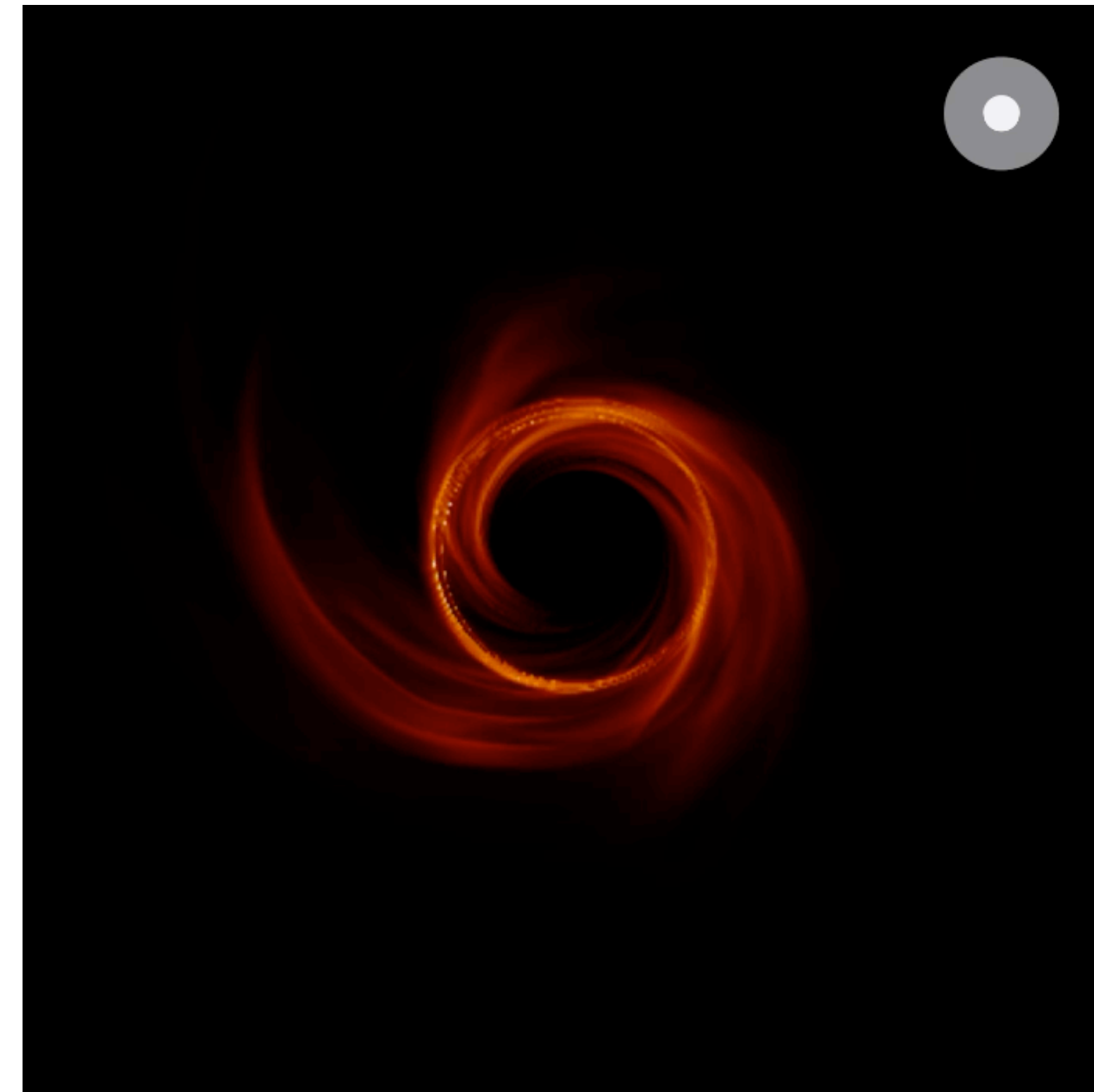
[図6] いて座A* (左) とM87 (右) の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網 (EAVN) で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。(クレジット: EHT Collaboration, EAVN Collaboration)

これからの観測ターゲットは動画

ブラックホールの回転軸の傾きも知りたい



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



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

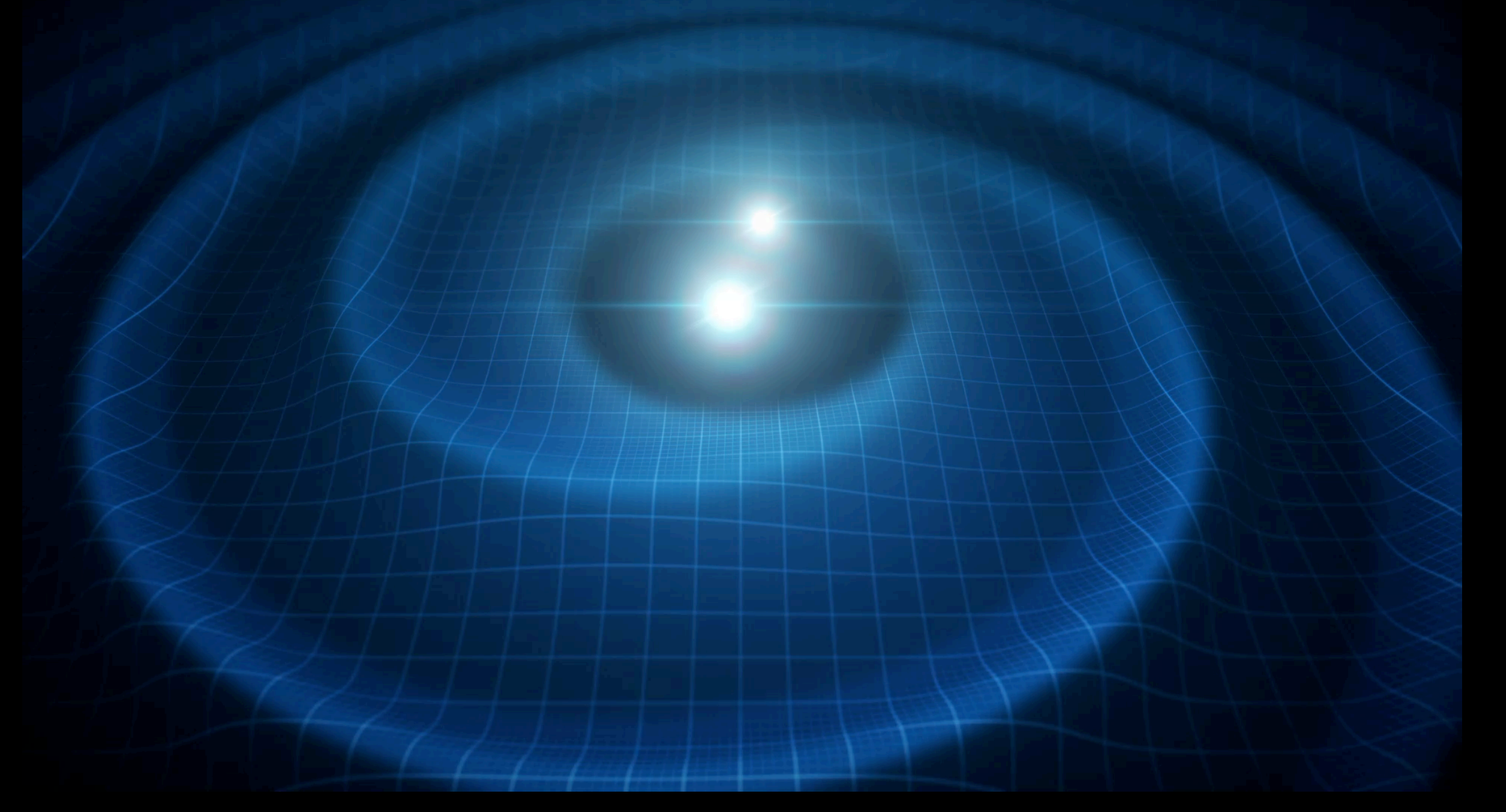
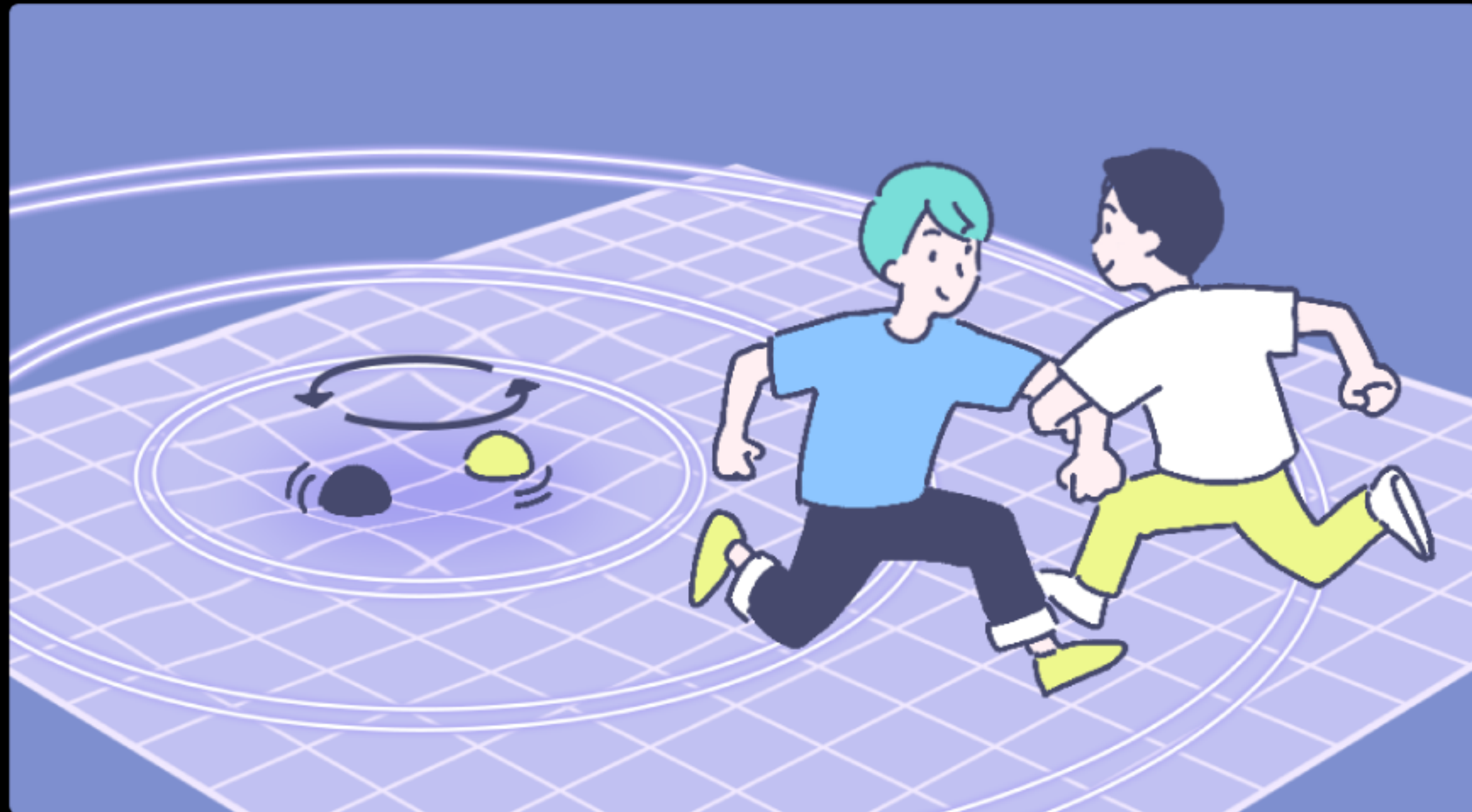
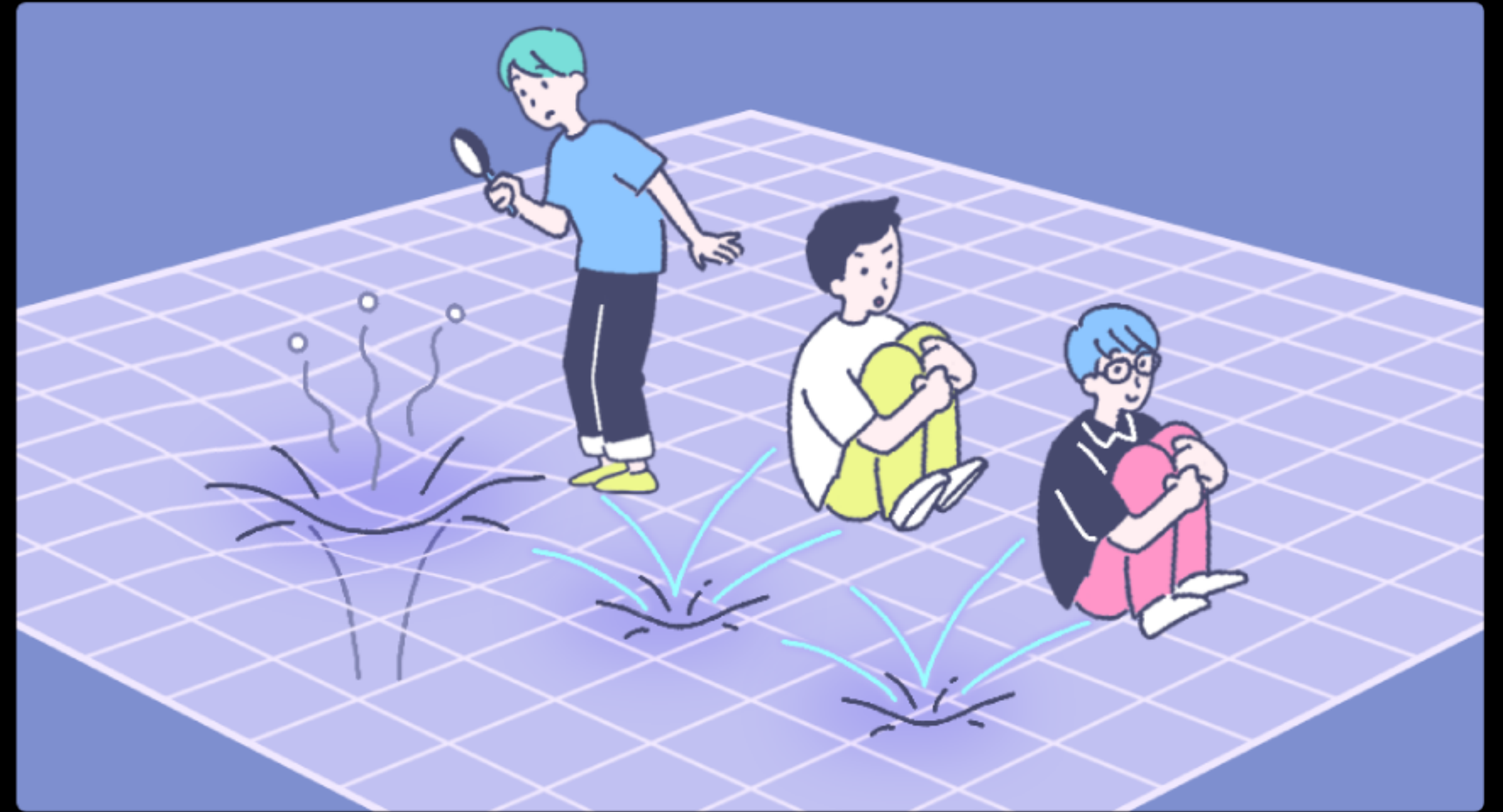
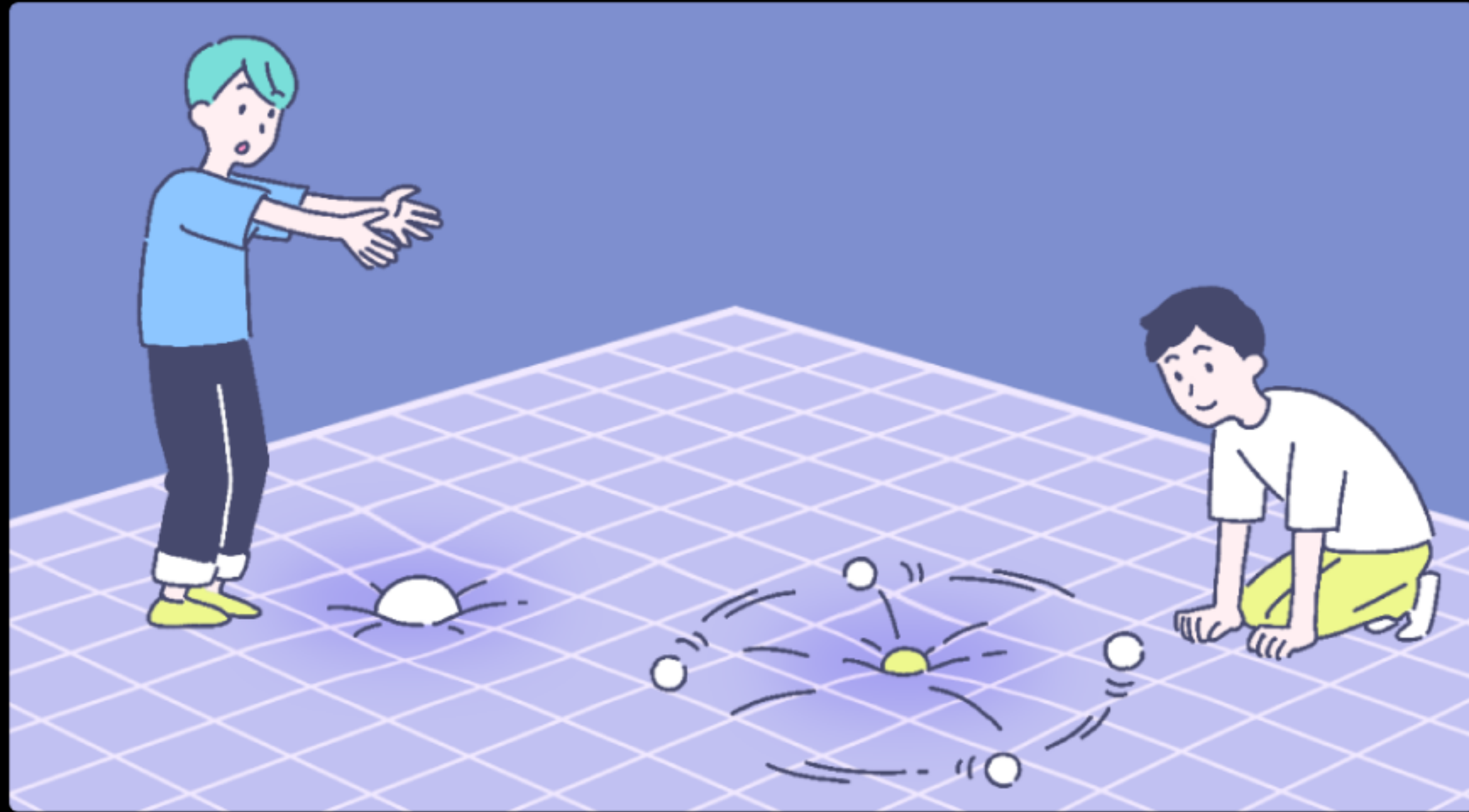
<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20220512-eh/videos.html>

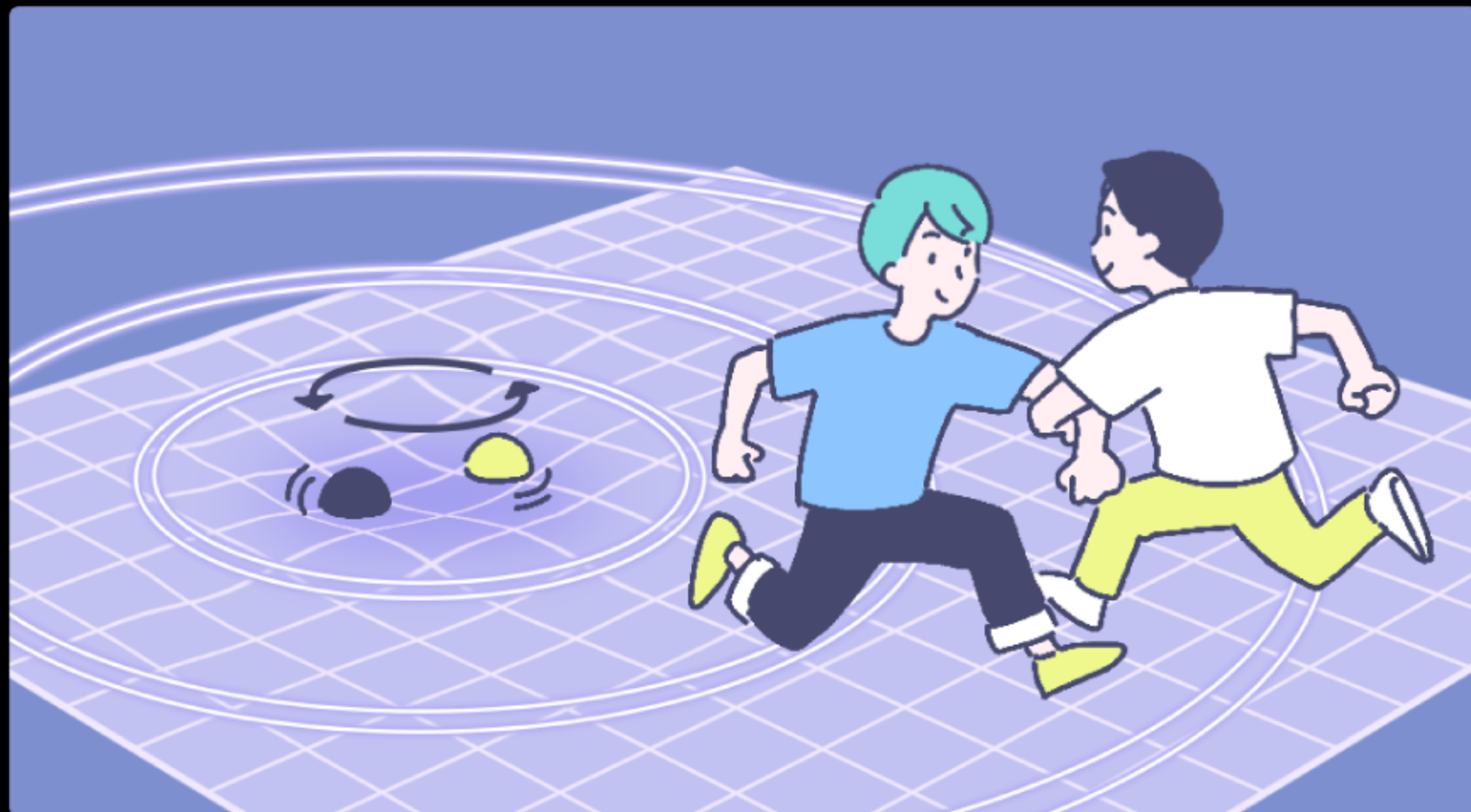
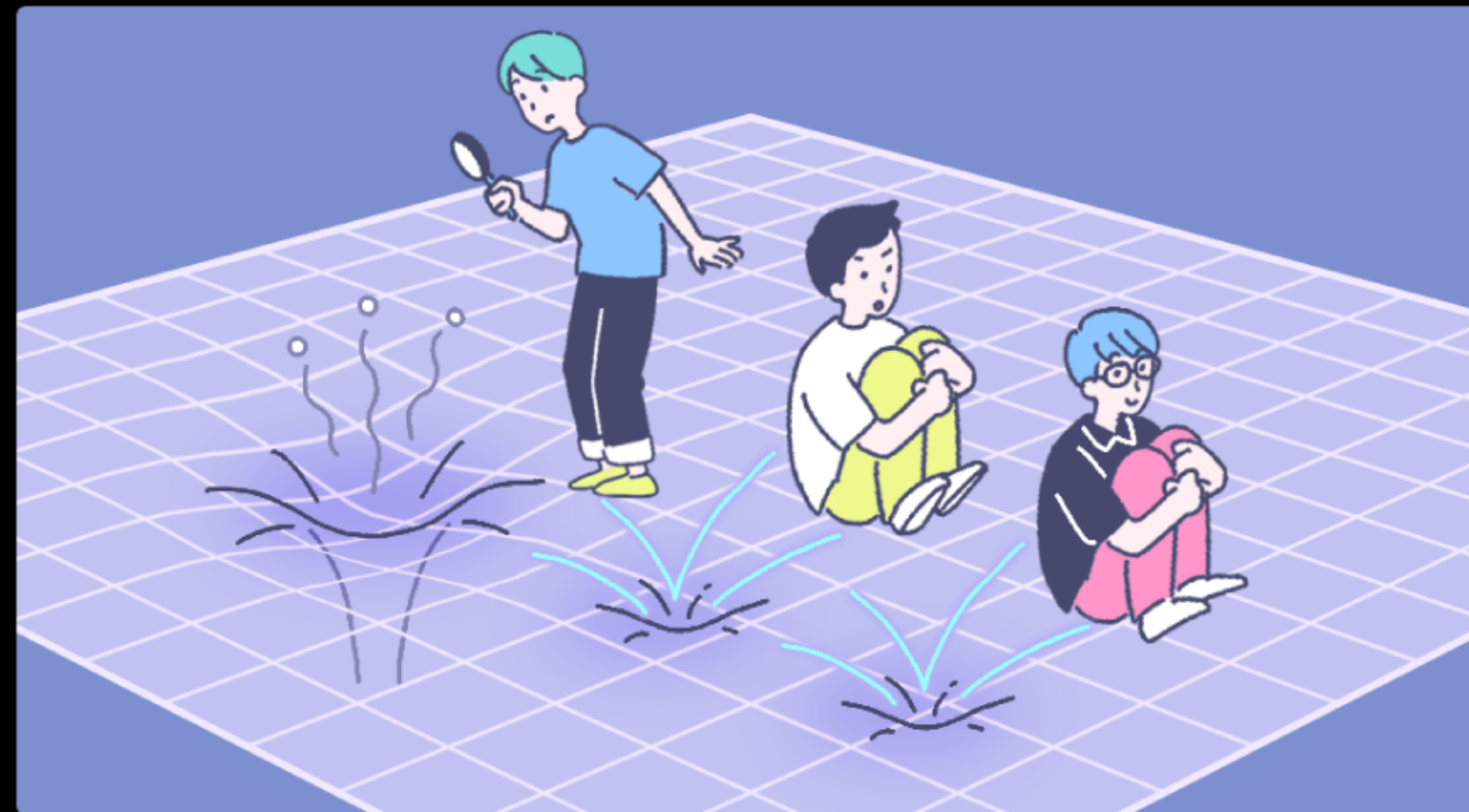
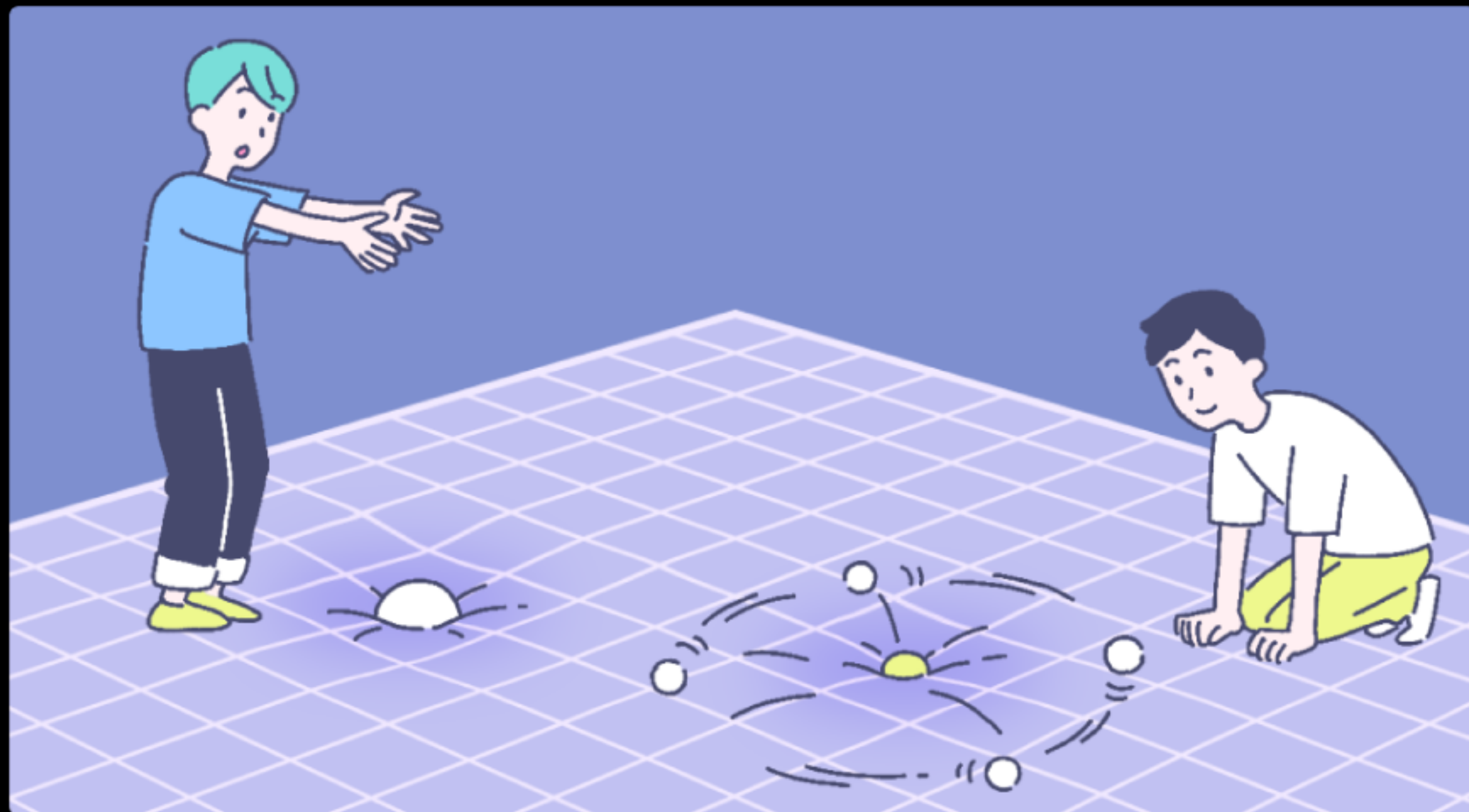
重力波

gravitational wave

重力を伝える波が存在するはず.

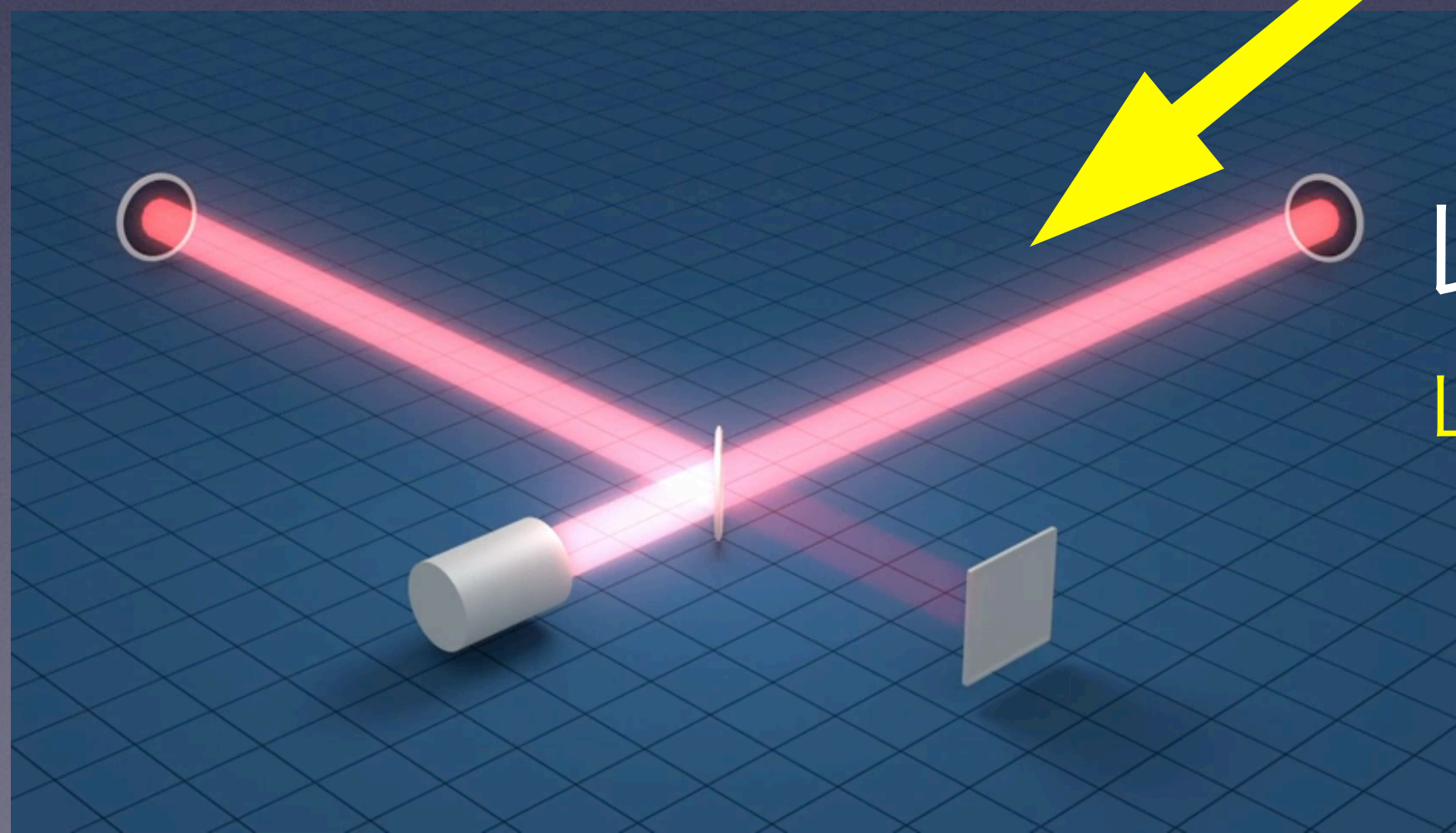
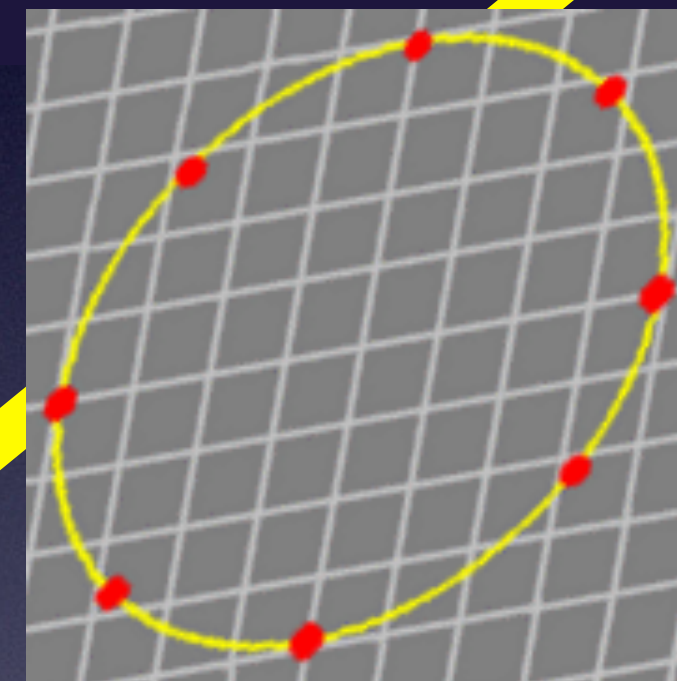
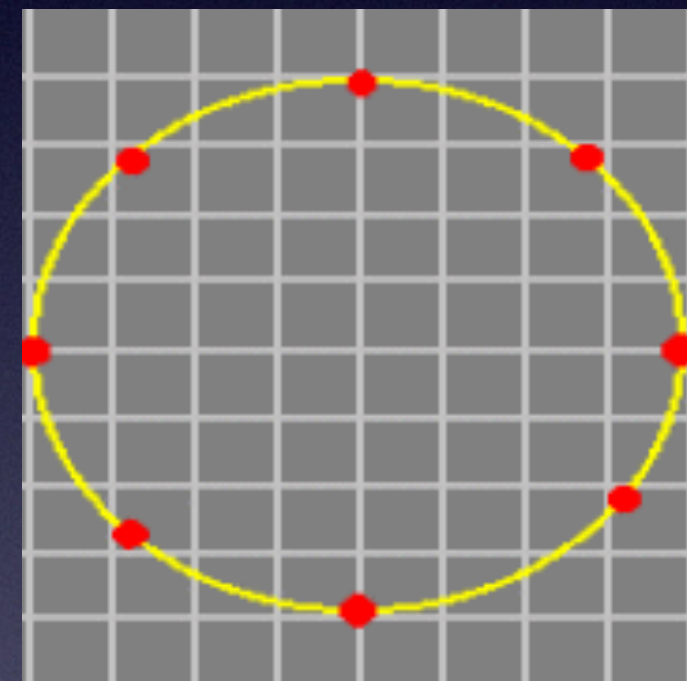
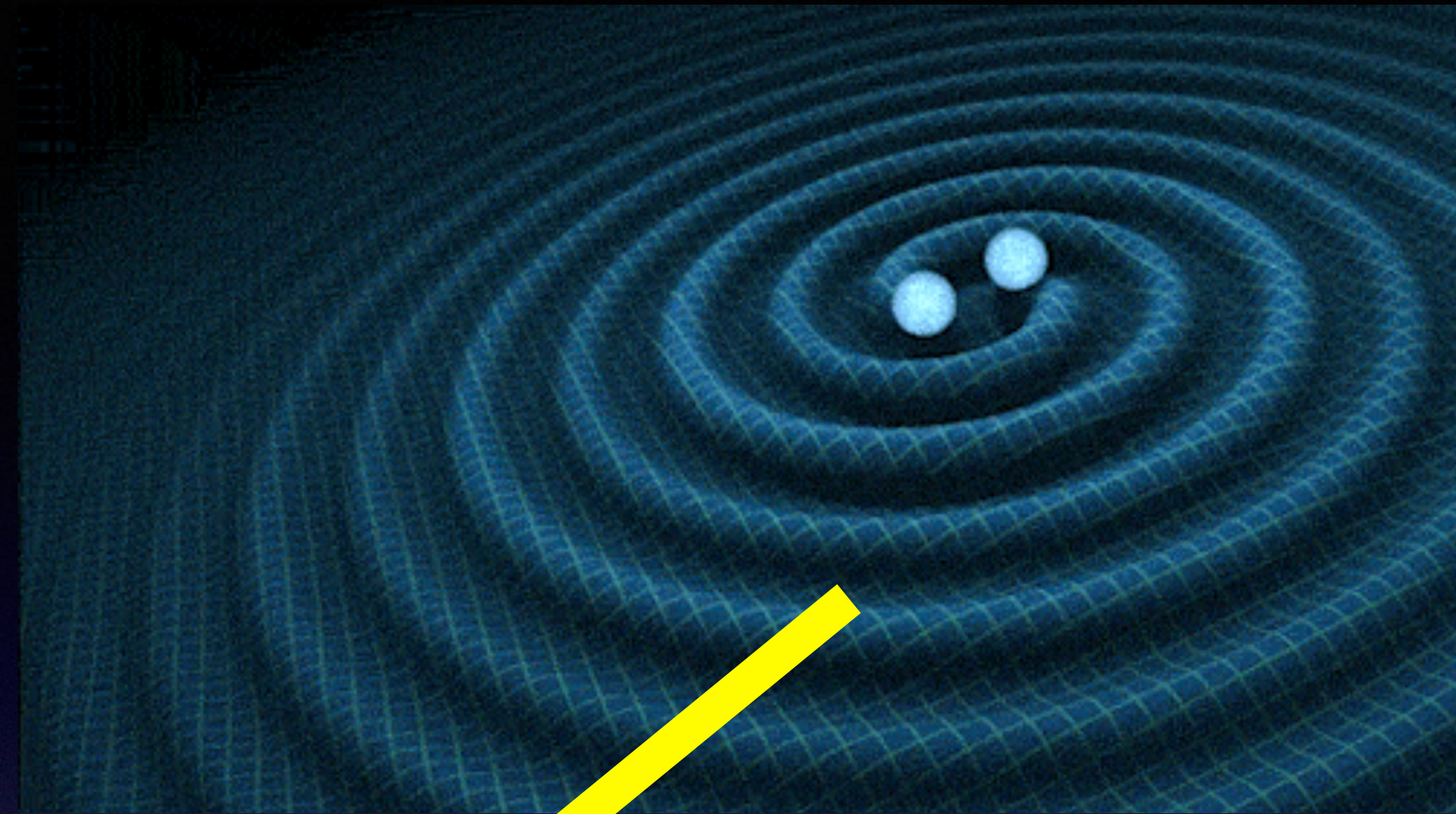
現在の, 一般相対性理論研究の中心課題.





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

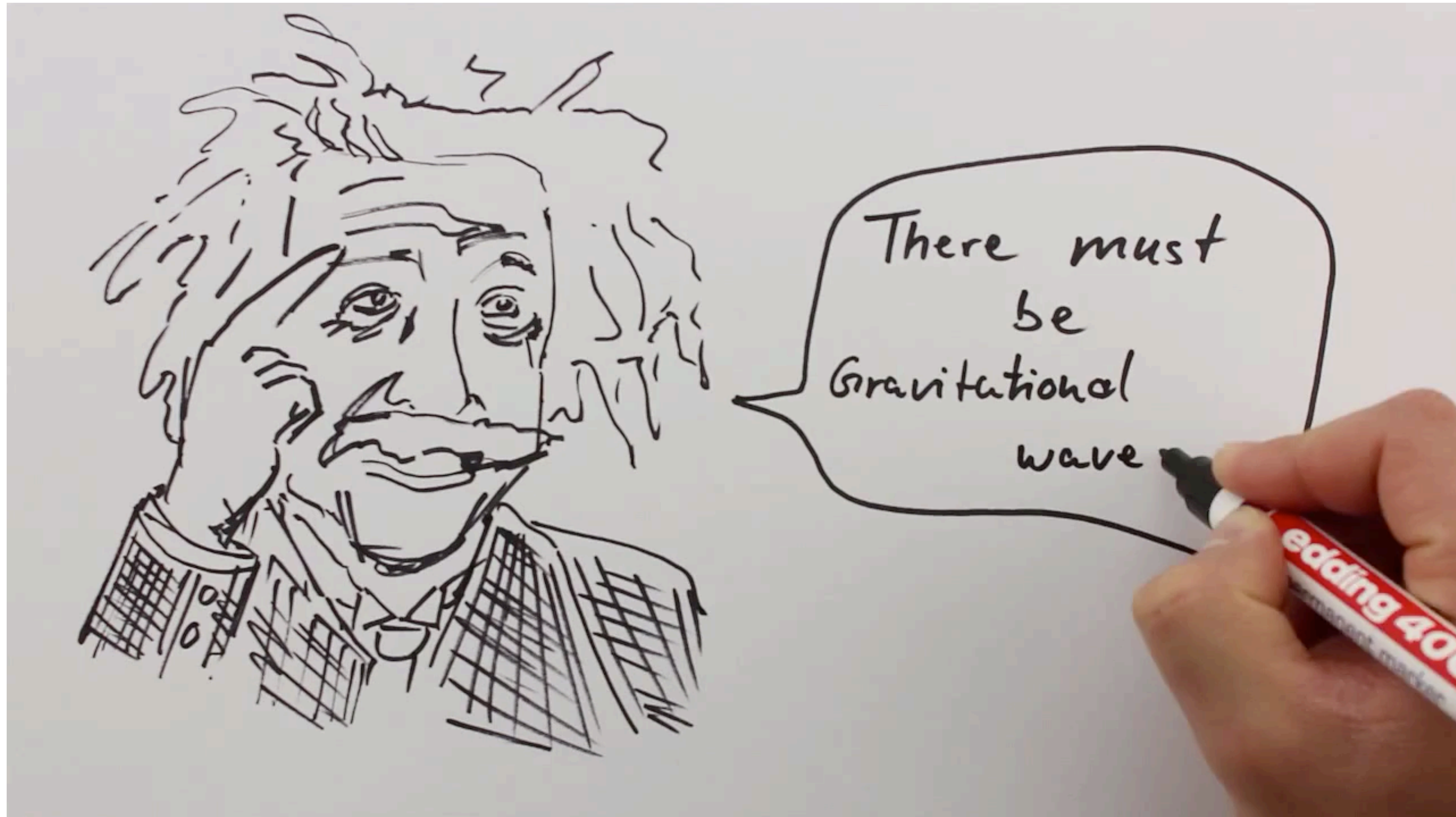


レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

Gravity Ink. - The Future of Astronomy (Episode 2)



LISAcommunity <http://support.elisascience.org>

Hand: Pavel Gurov Voice: Heather Audley

Concept: Oliver Gerberding, Simon Barke, Heather Audley, Benjamin Knispel

[Start on click, 3 min](#)

http://www.youtube.com/watch?v=8Kelu5_Kks4

重力波の波源

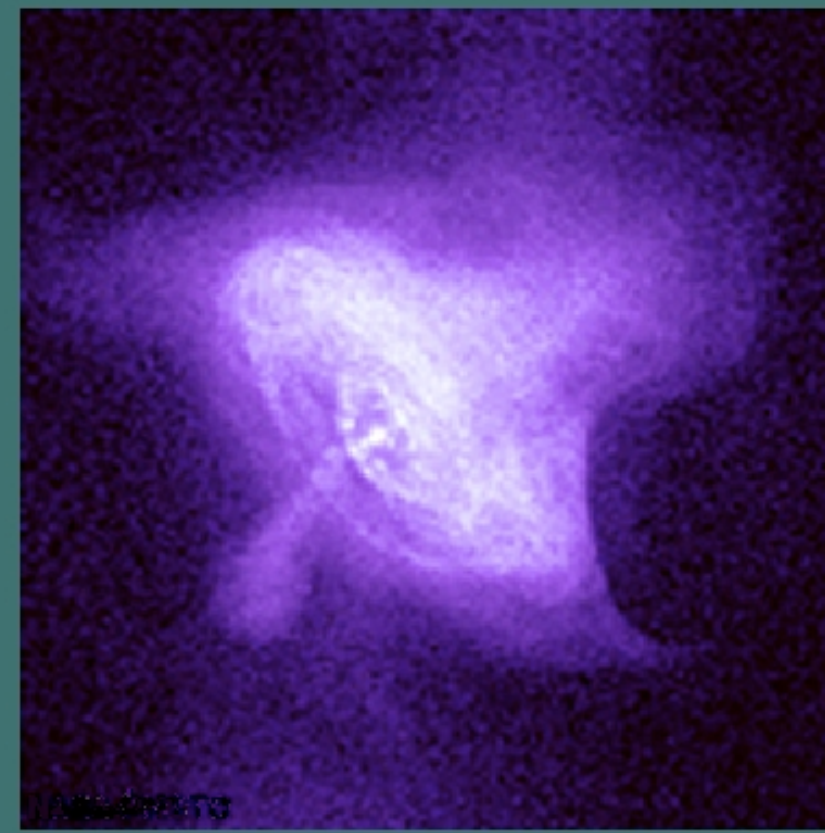
sources of gravitational wave

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

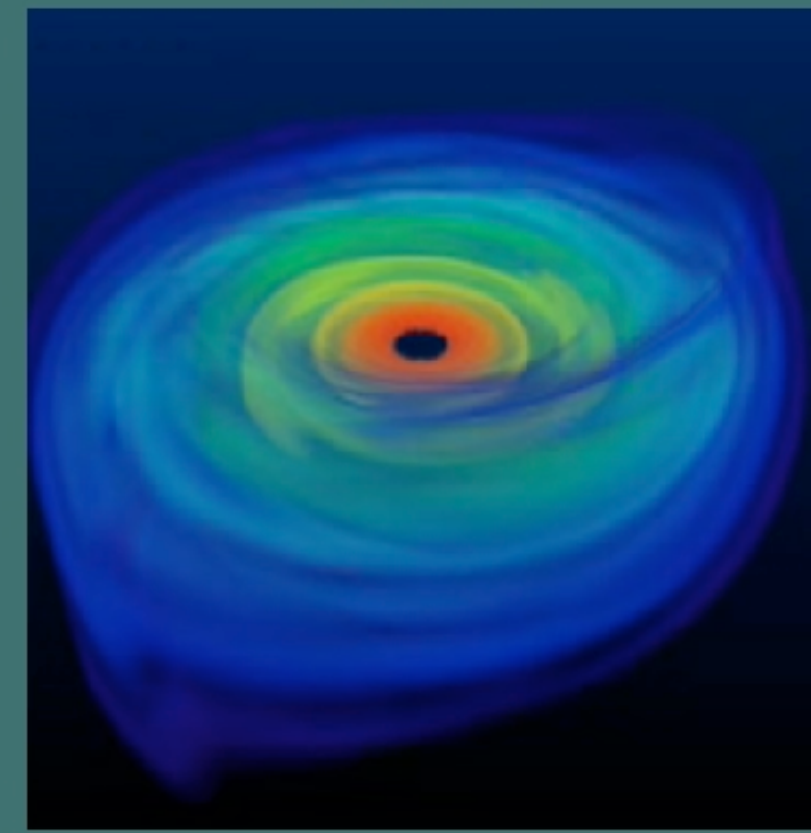
超新星爆発 (写真出典: NASA)



パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)



連星中性子星合体
(想像図)



予測が難しい

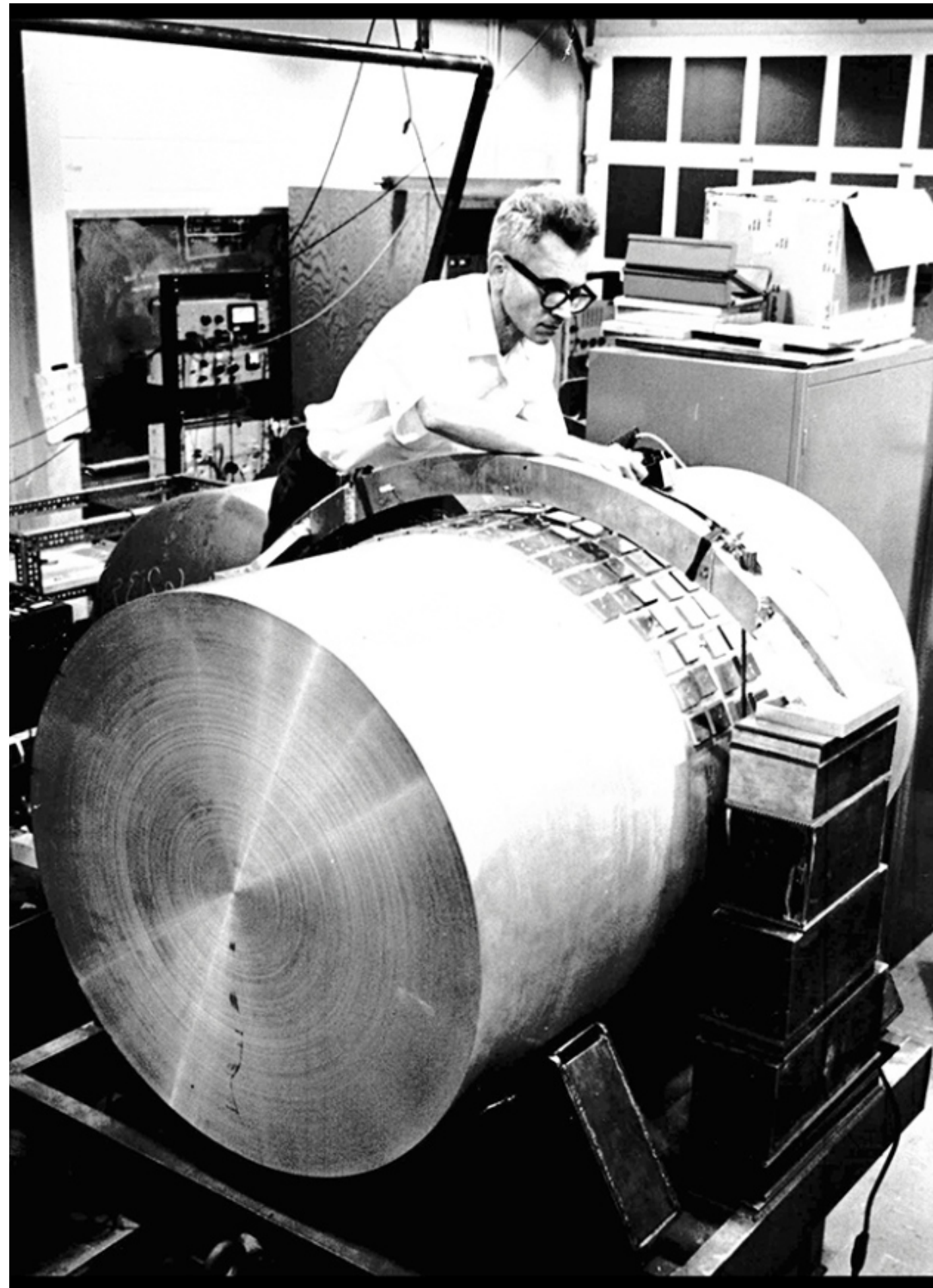
振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体を
ターゲットに

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

重力波 幻の発見（1968/70）



ウェーバー
Joseph Weber

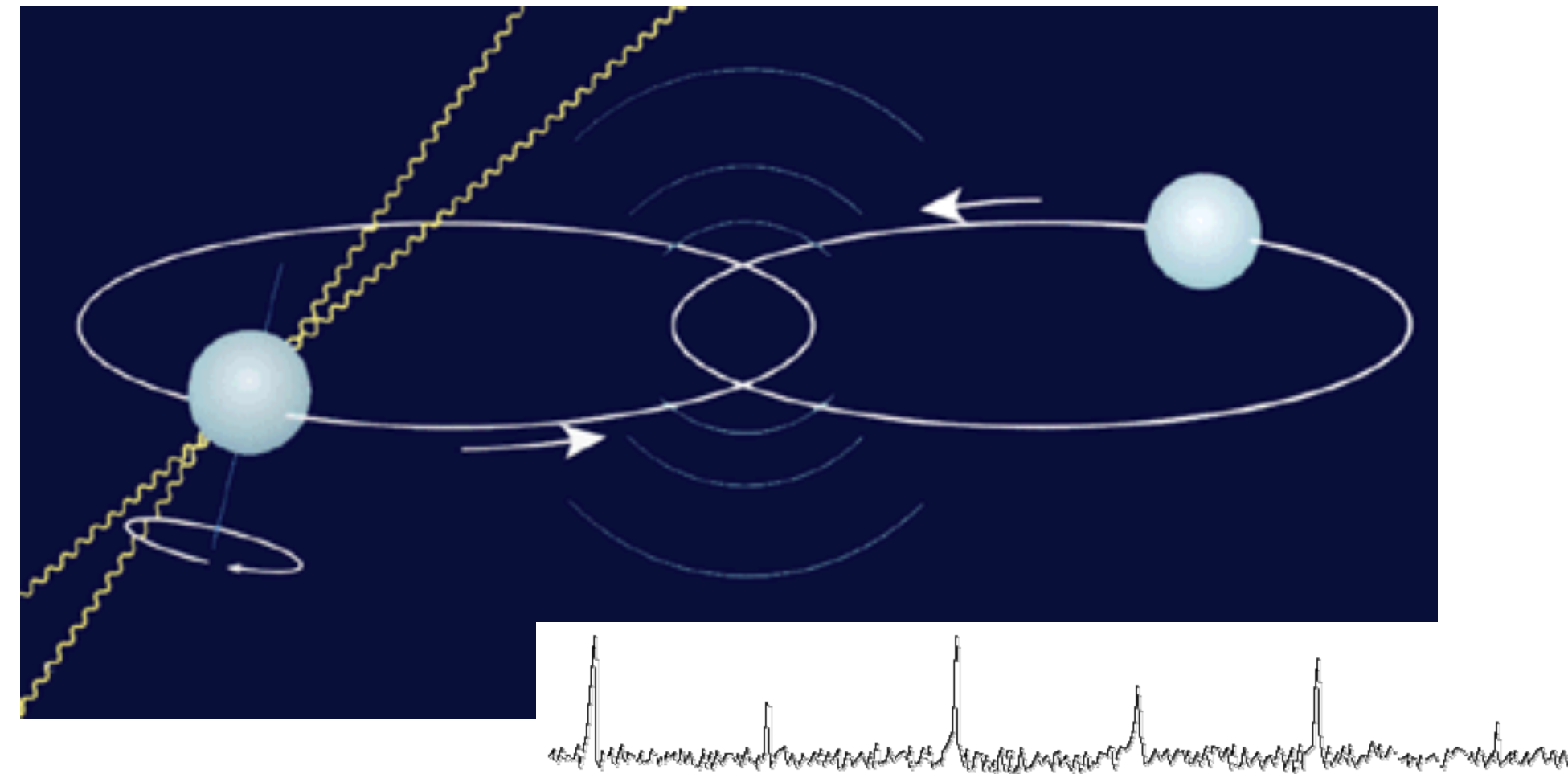
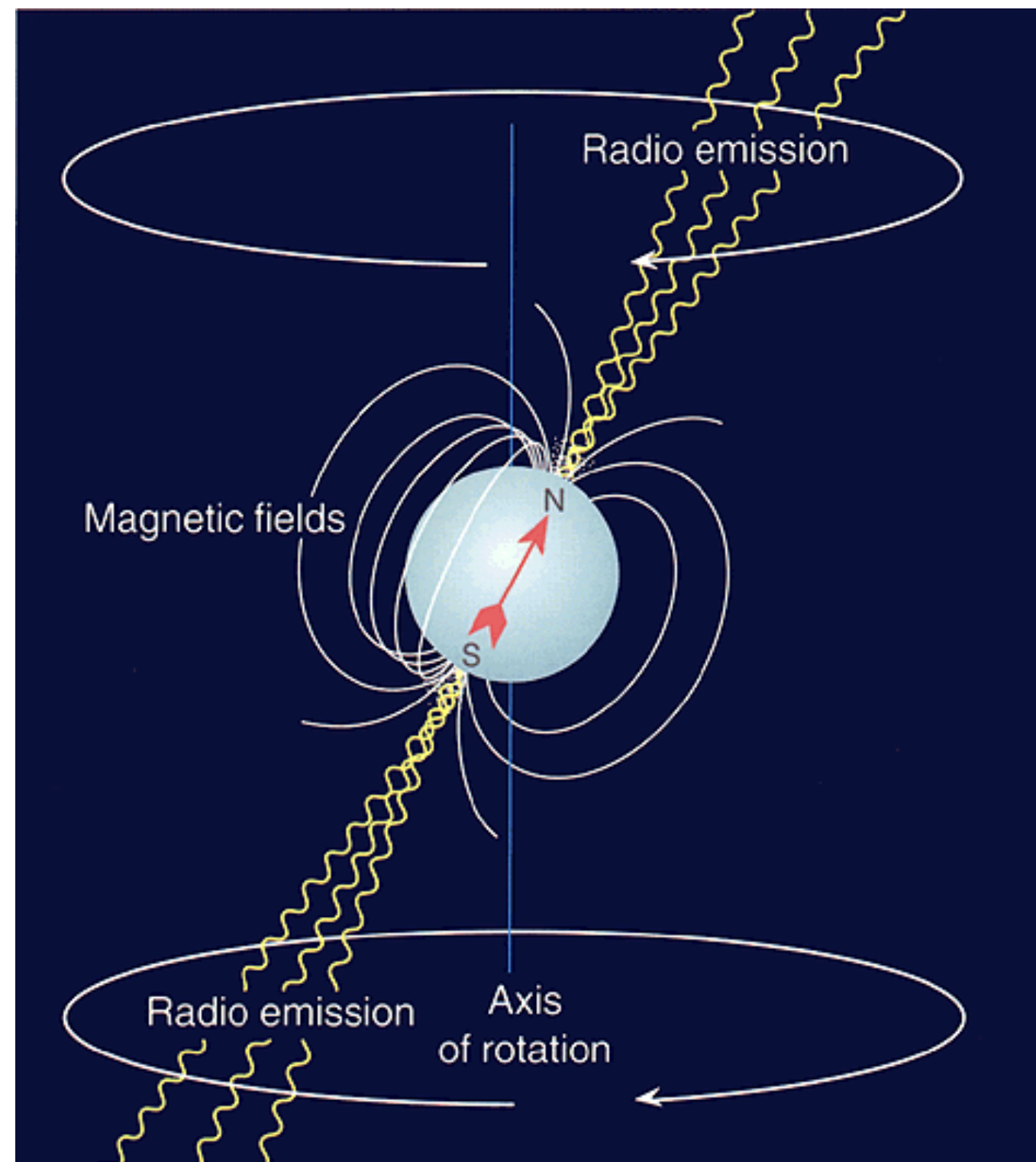
Joseph Weber (**pictured**), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that ‘rang’ when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

68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

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

と発表したが、他のグループで追試されず.

連星中性子星の発見 (1974)

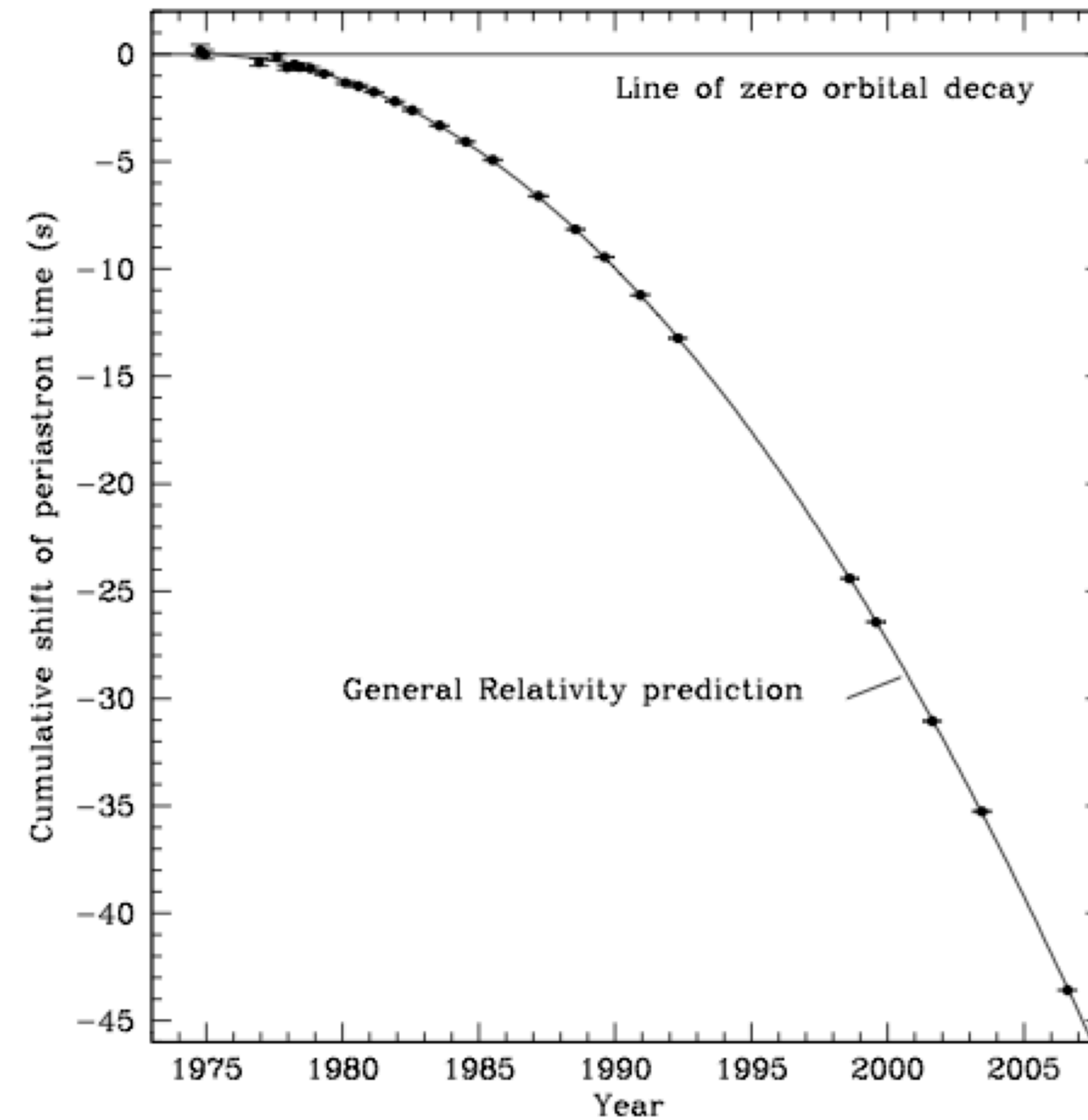
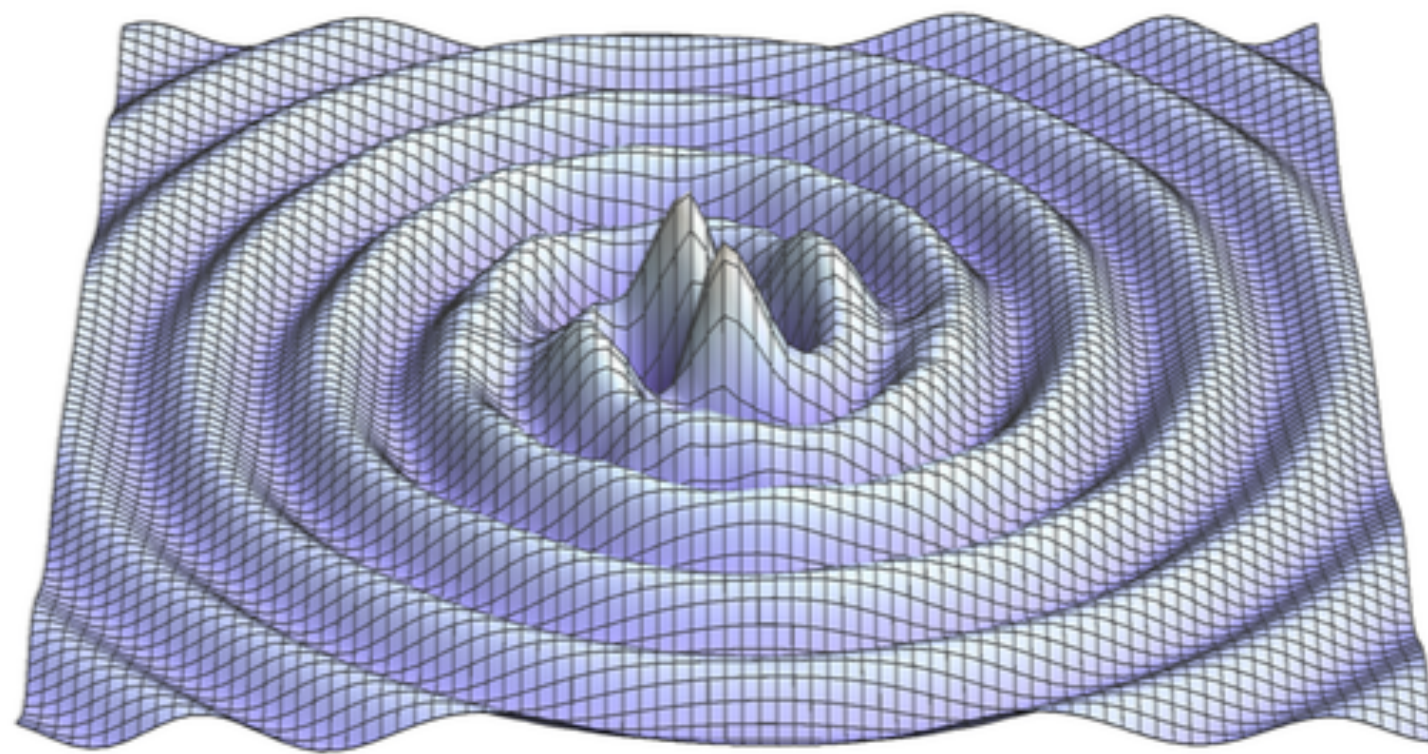
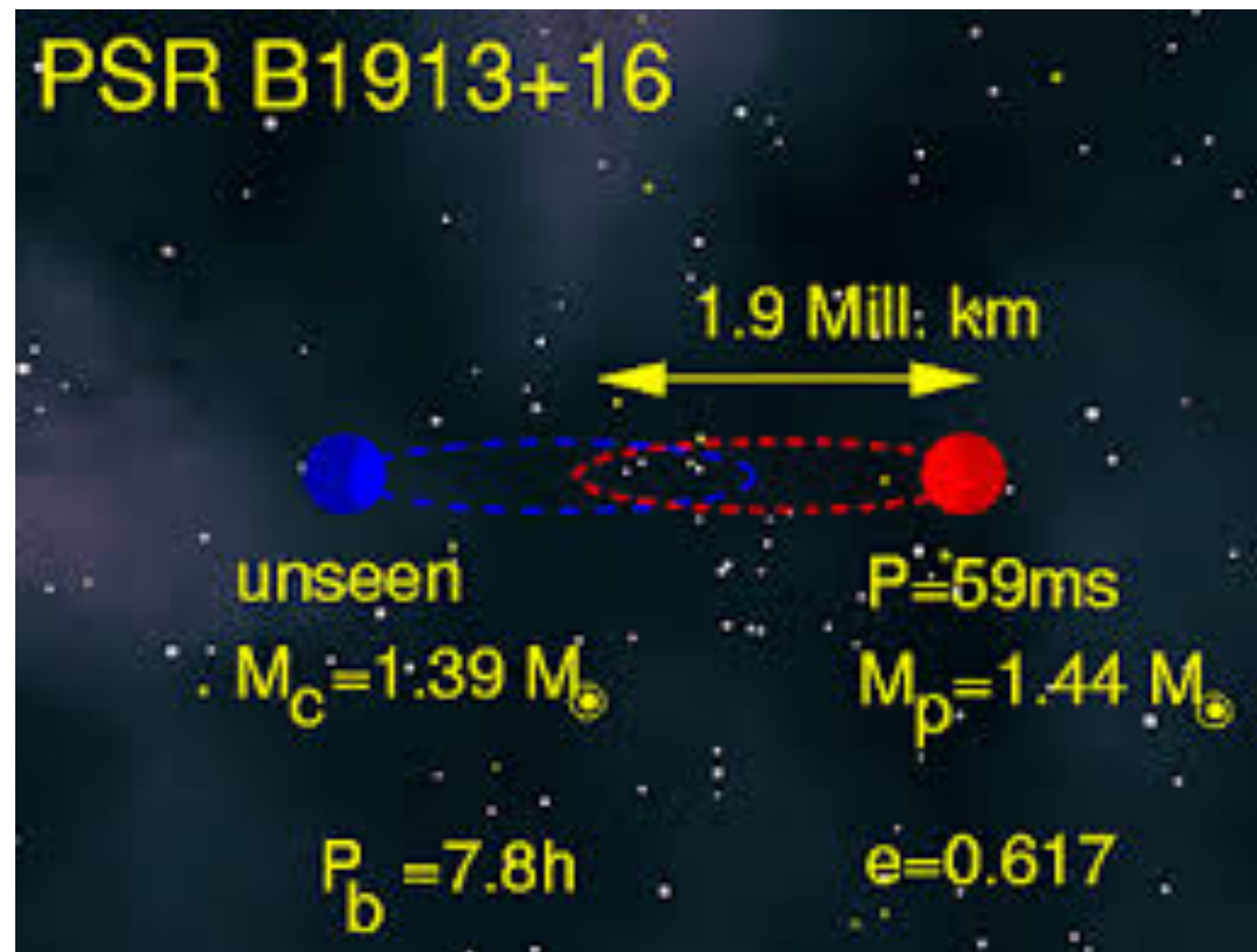


Arecibo, Puerto Rico

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+](#) [Twitter](#) [+](#) [Email](#) 25

The Nobel Prize in Physics 1993



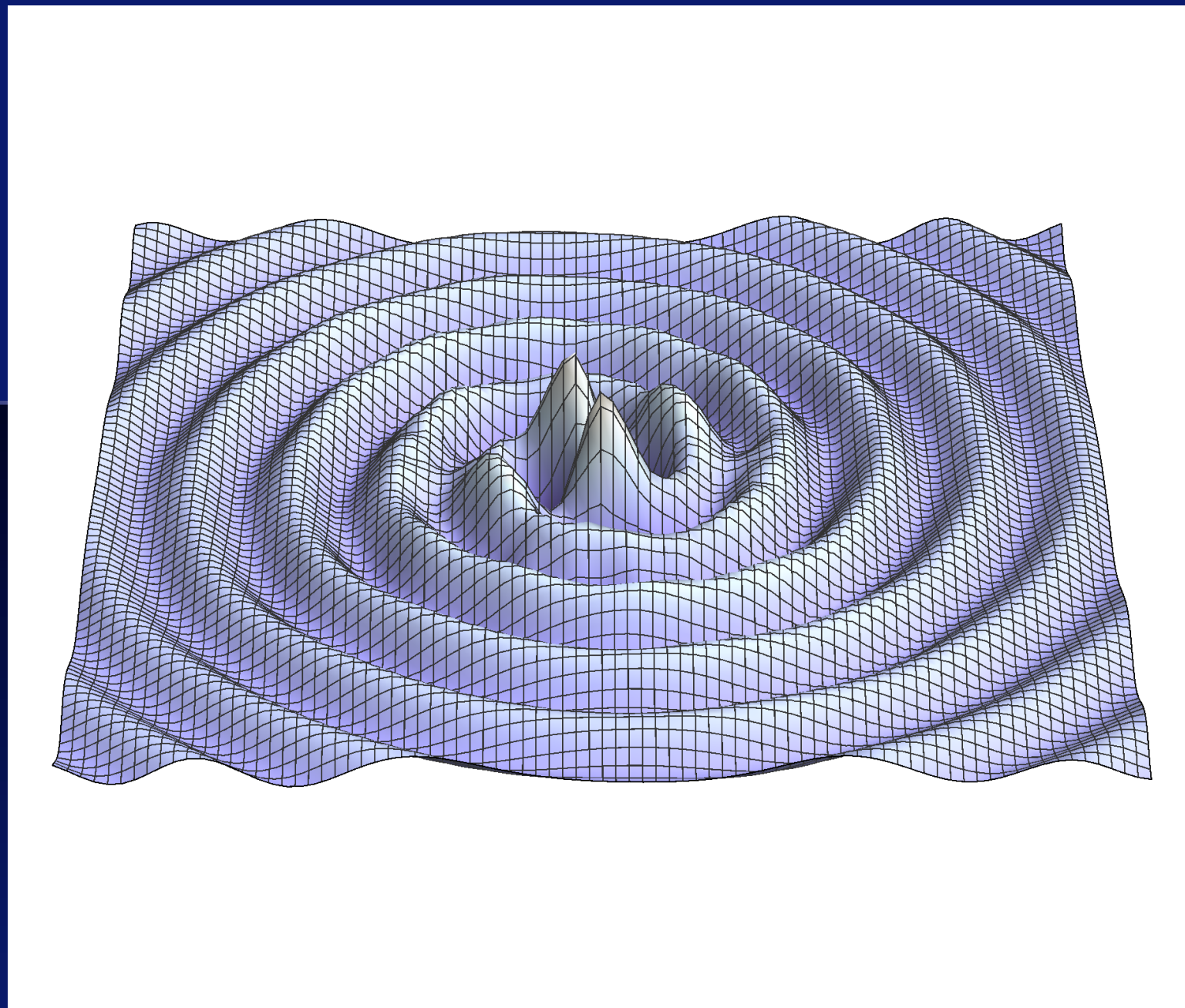
Russell A. Hulse
Prize share: 1/2



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

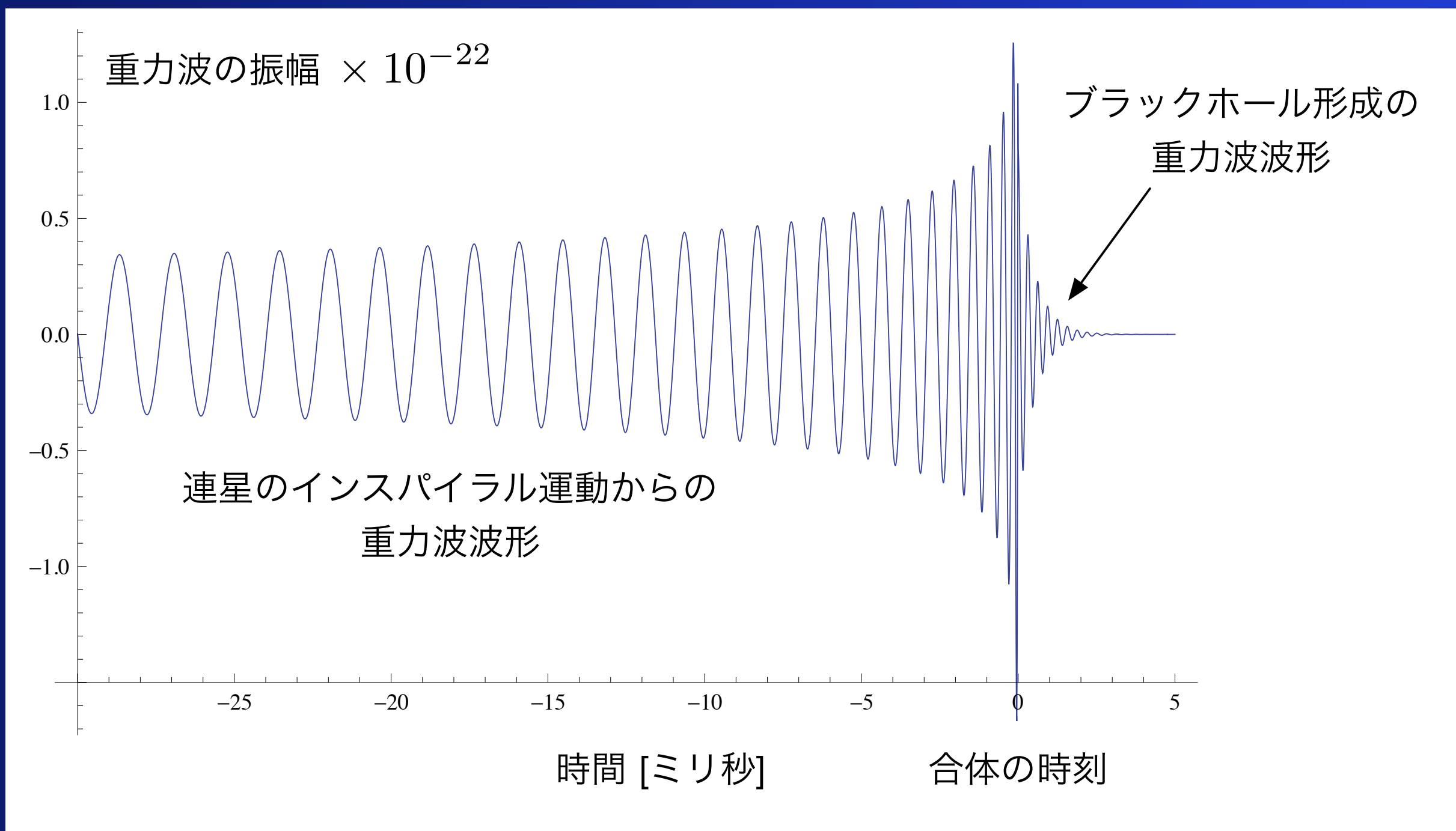
"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

"重力についての新しい研究を開いた、新種のパルサーの発見に対して"

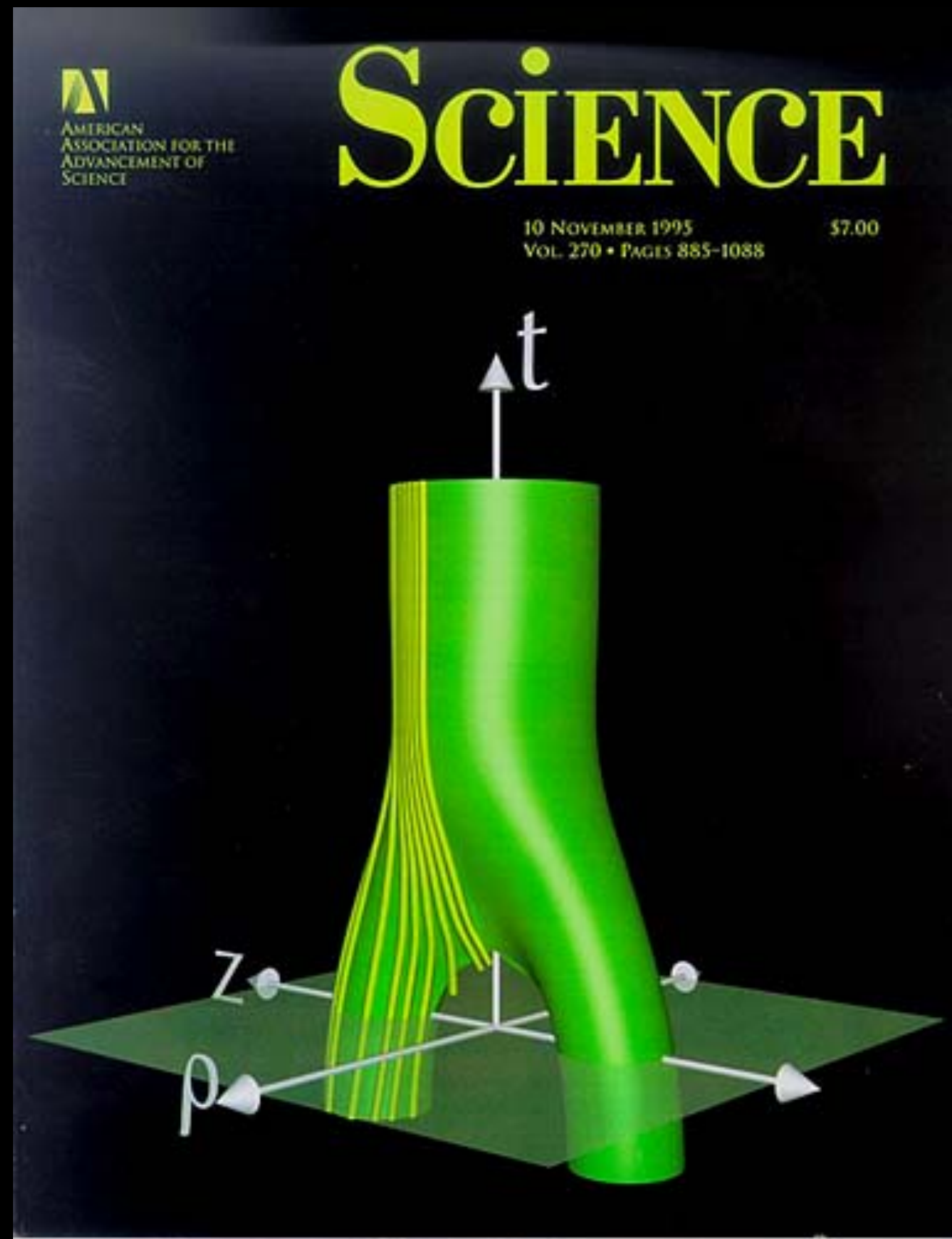


重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星
連星ブラックホール

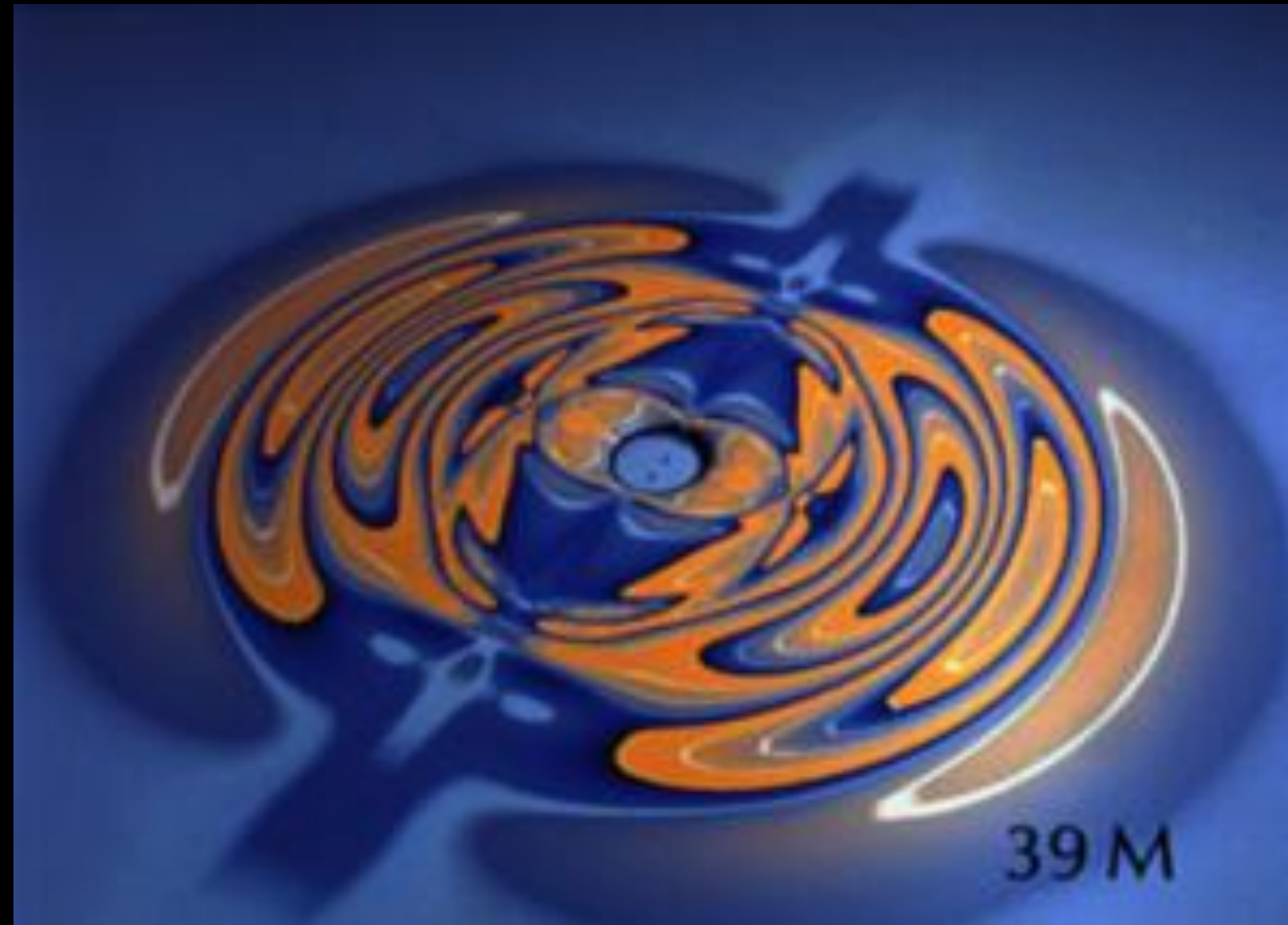


ブラックホール合体と重力波放出のシミュレーション (1990年代–2000年代)



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

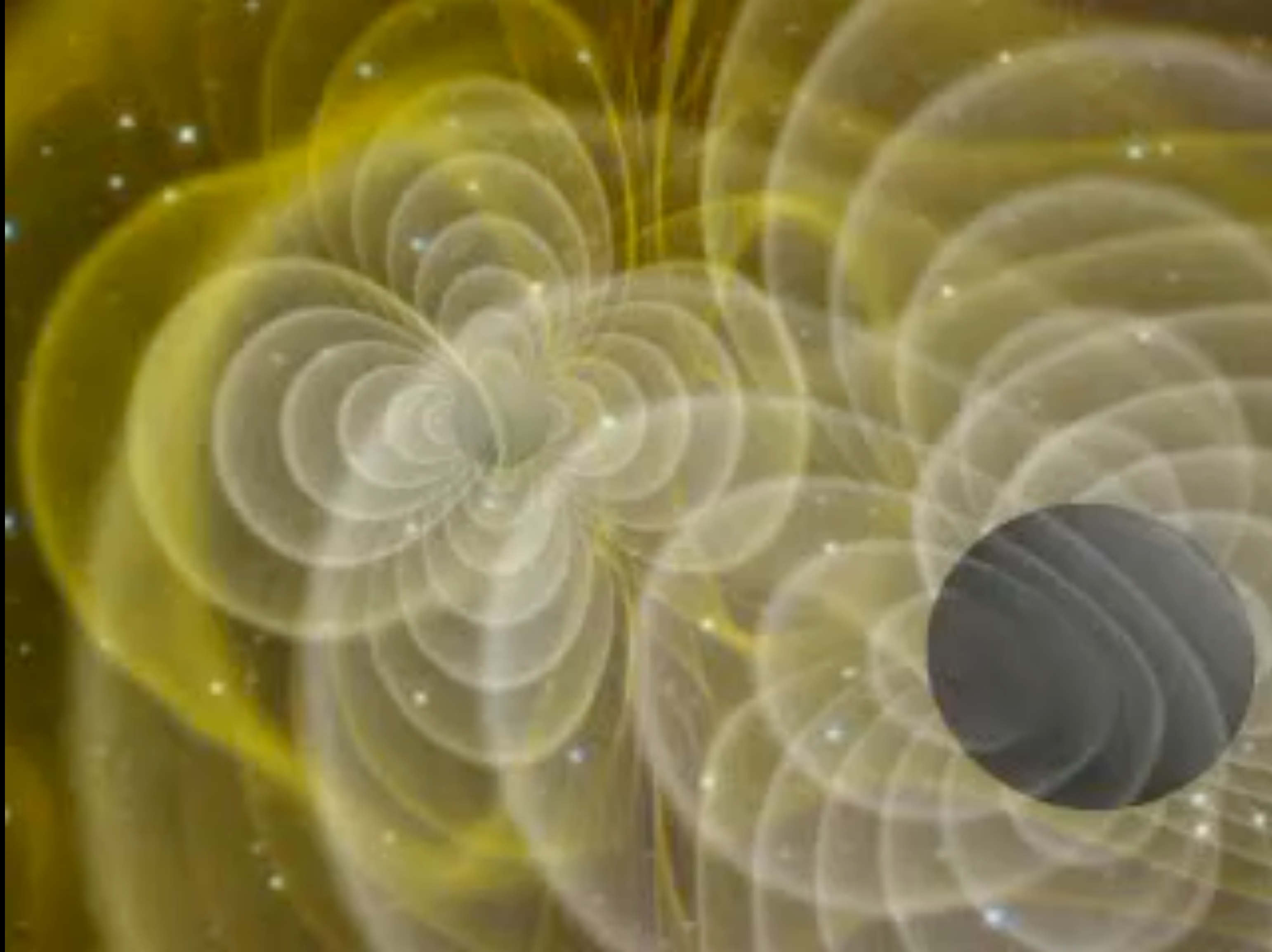
- * 安定な定式化問題

- * 解像度

- * スーパーコンピュータ

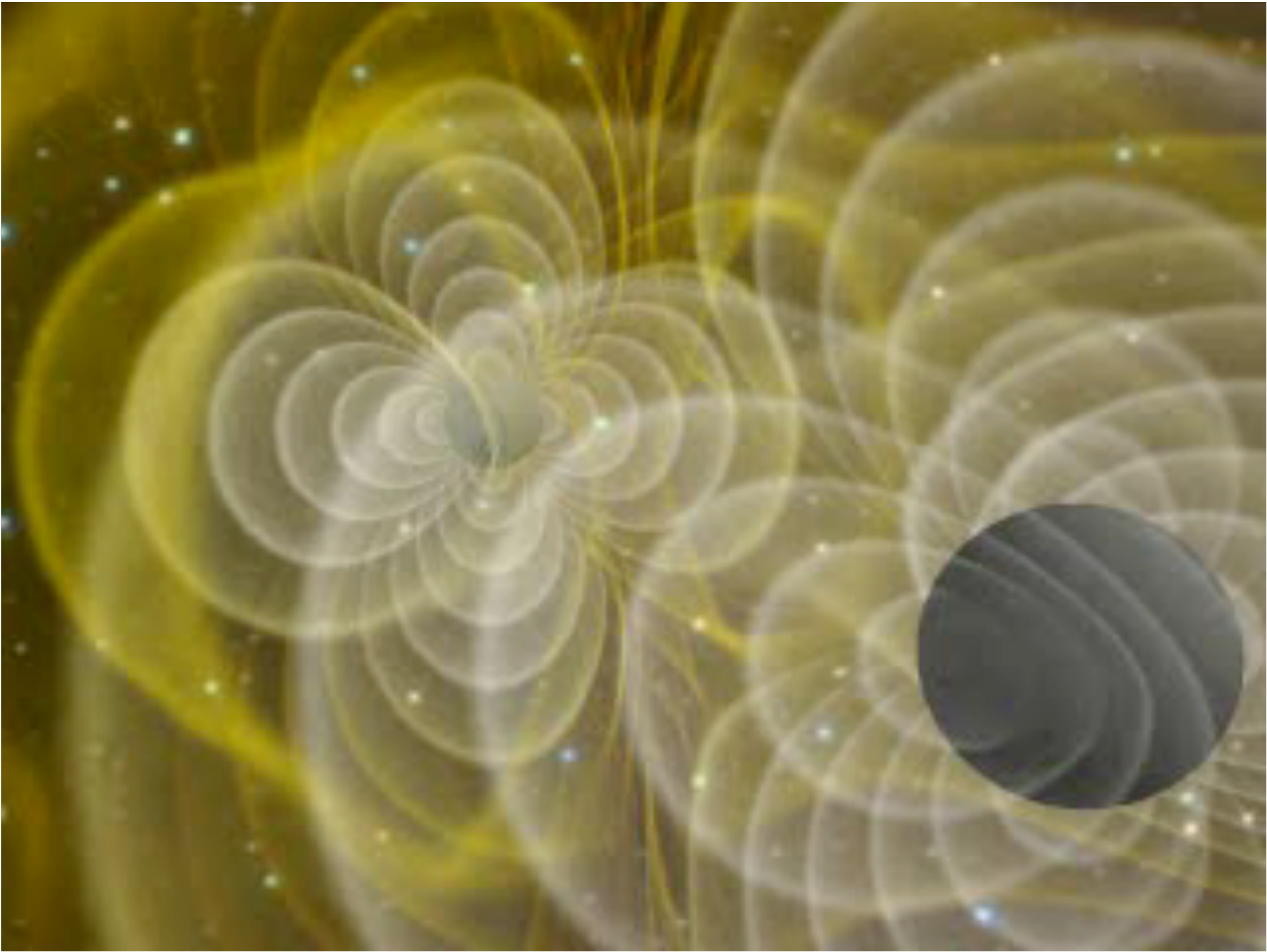
...

ブラックホールの合体シミュレーション

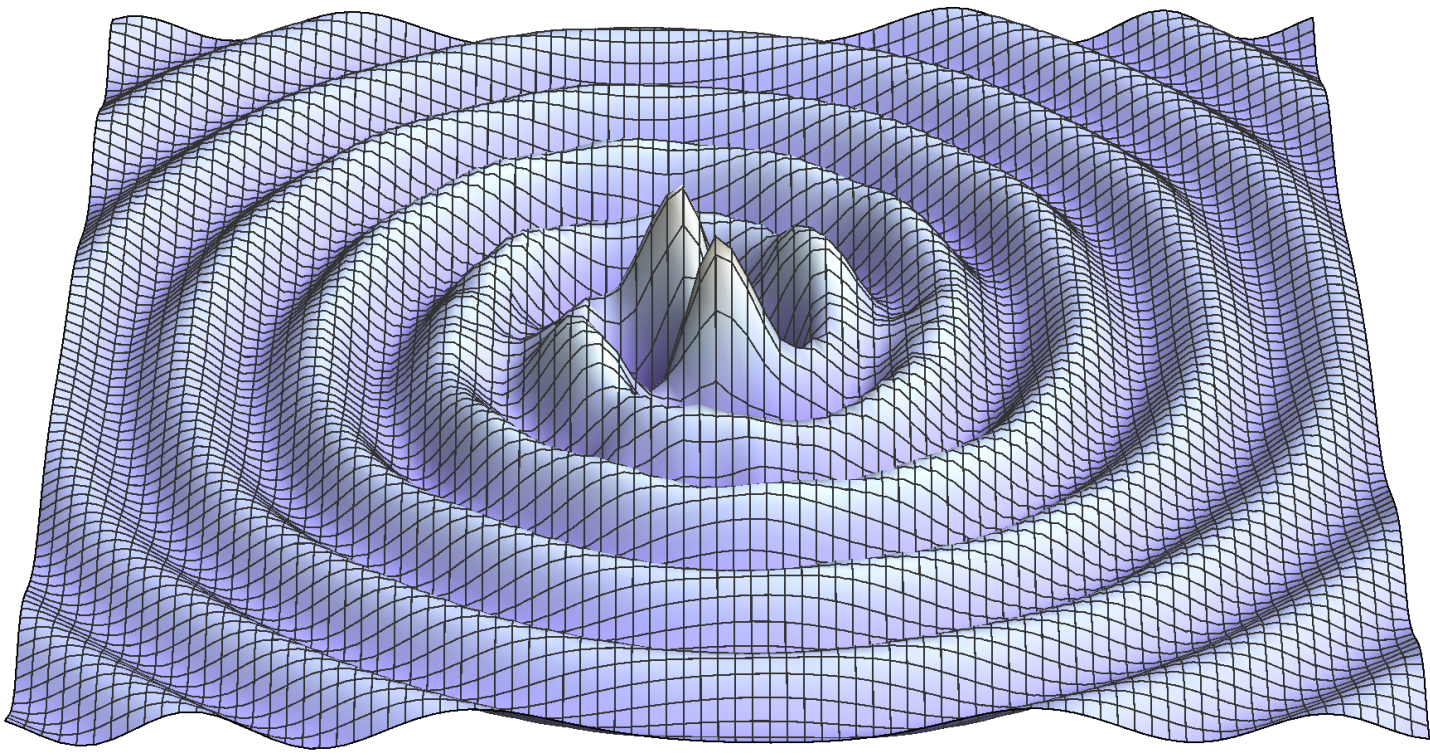


NCSA-AEI group (1998)

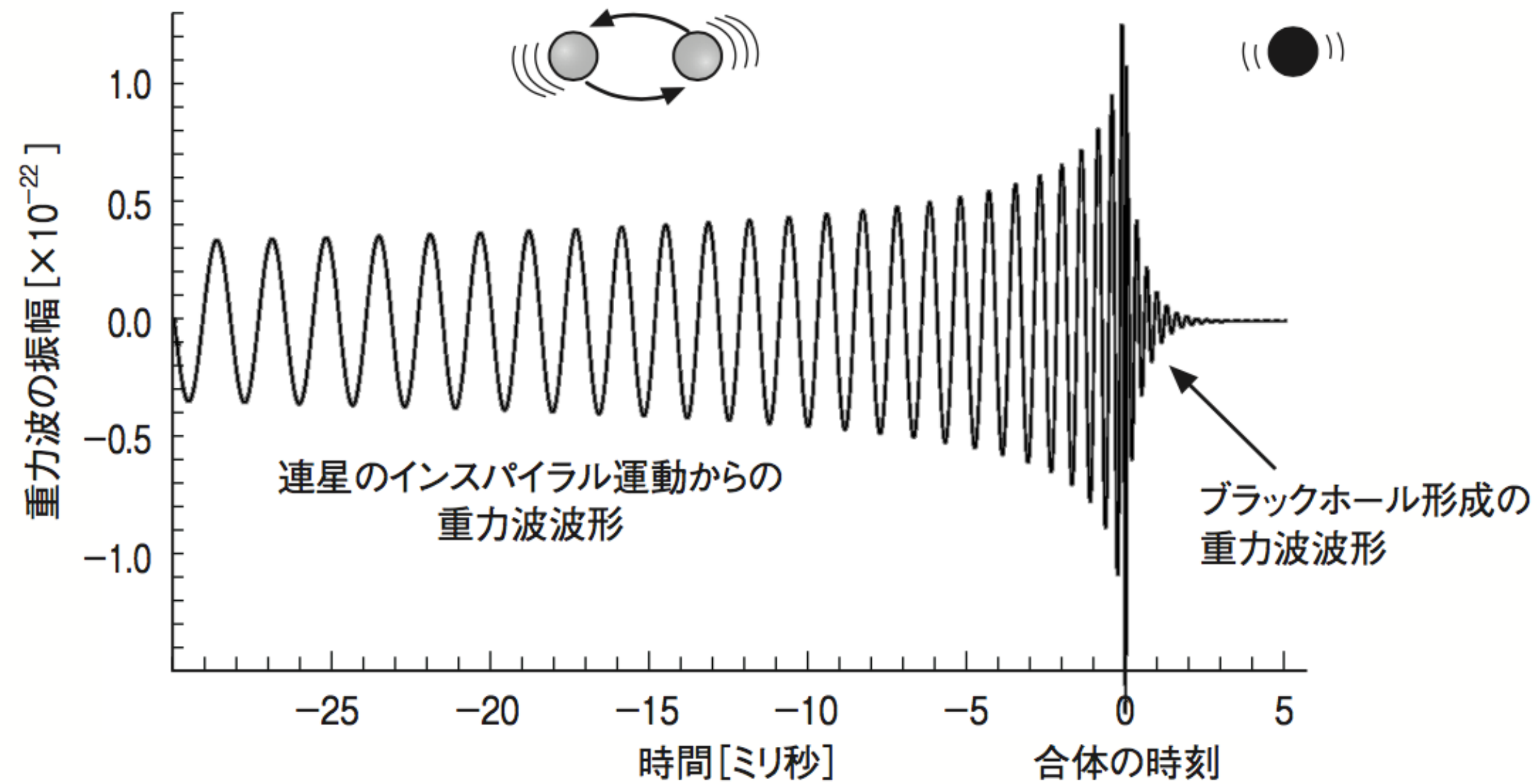
連星合体からの重力波の波形(理論予測)



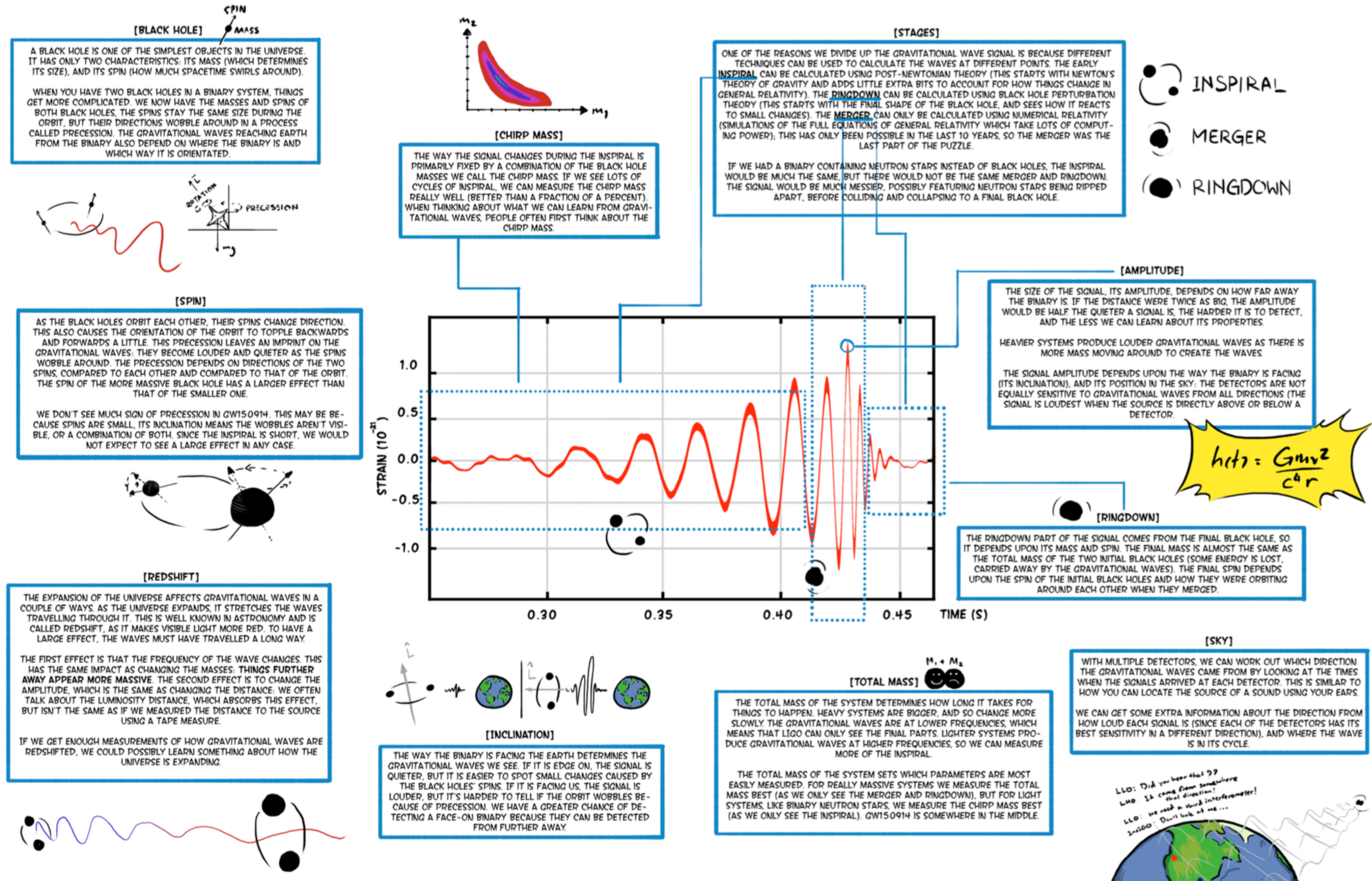
(NCSA-AEIグループ, 1998年)

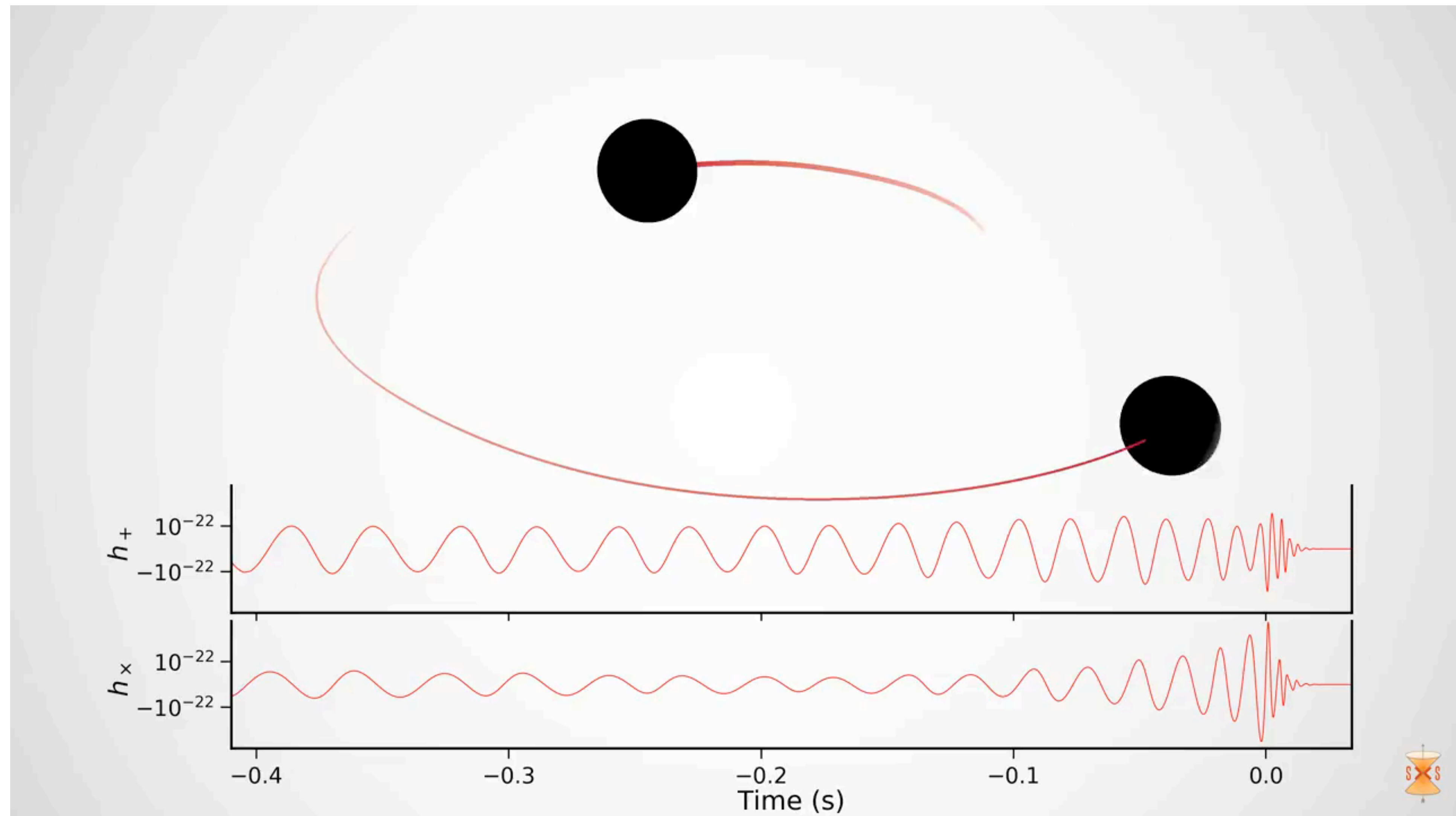


Inspiral **Merger** **Ringdown**



The waveform explained





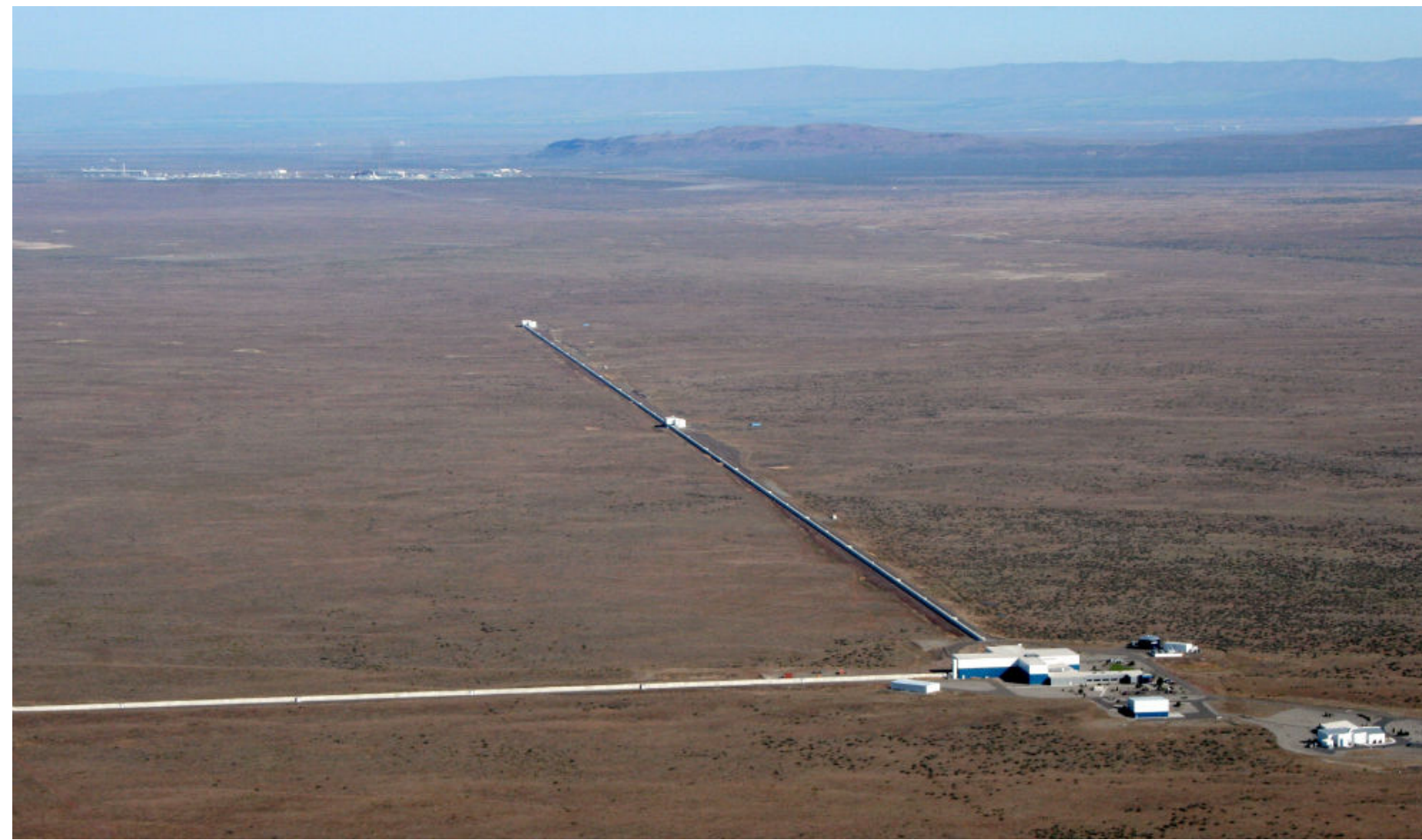
Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown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

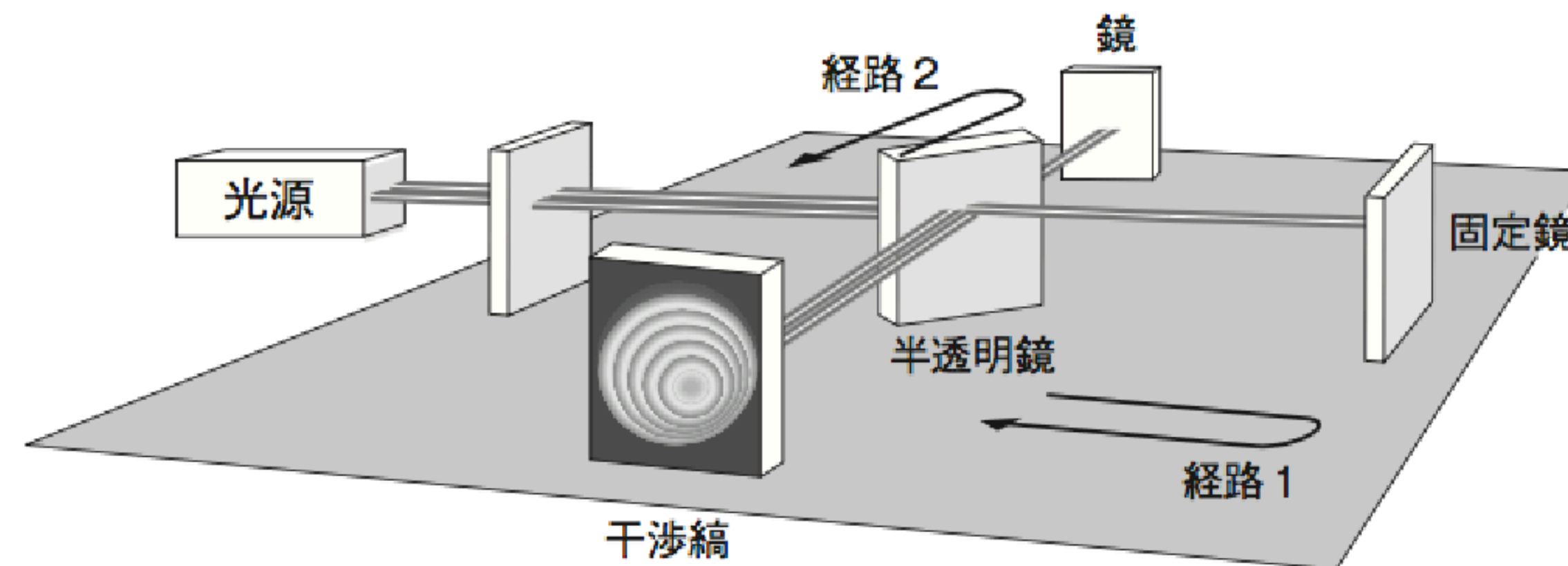
Finally, the slowed-down replay of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the distortion of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is "kicked" by the emitted gravitational waves, and moves upward. (Credit: A. Babul/H. Pfeiffer/CITA/SXS.) - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf>

LIGO(ライゴ:レーザー干渉計重力波天文台)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



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



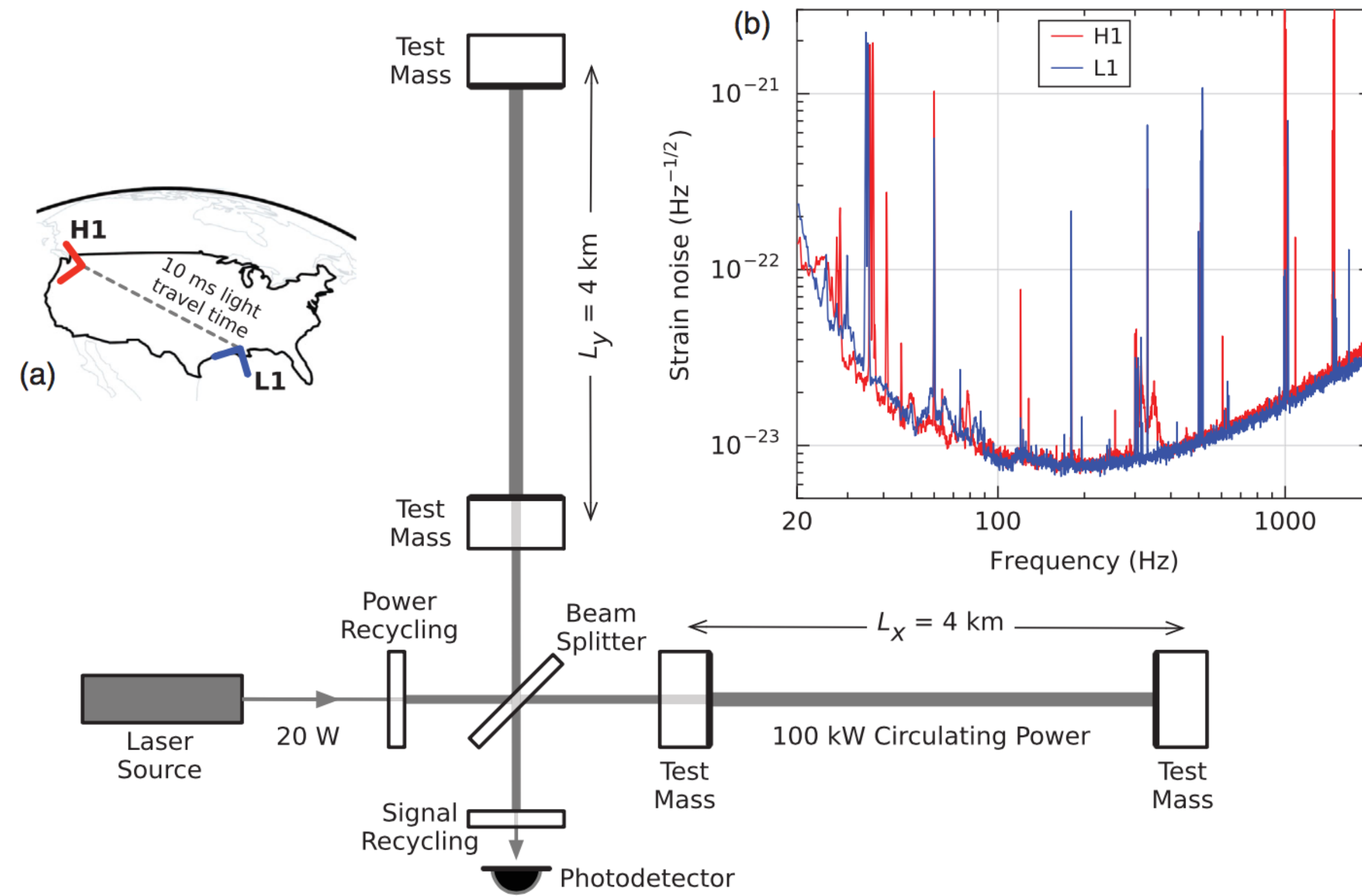
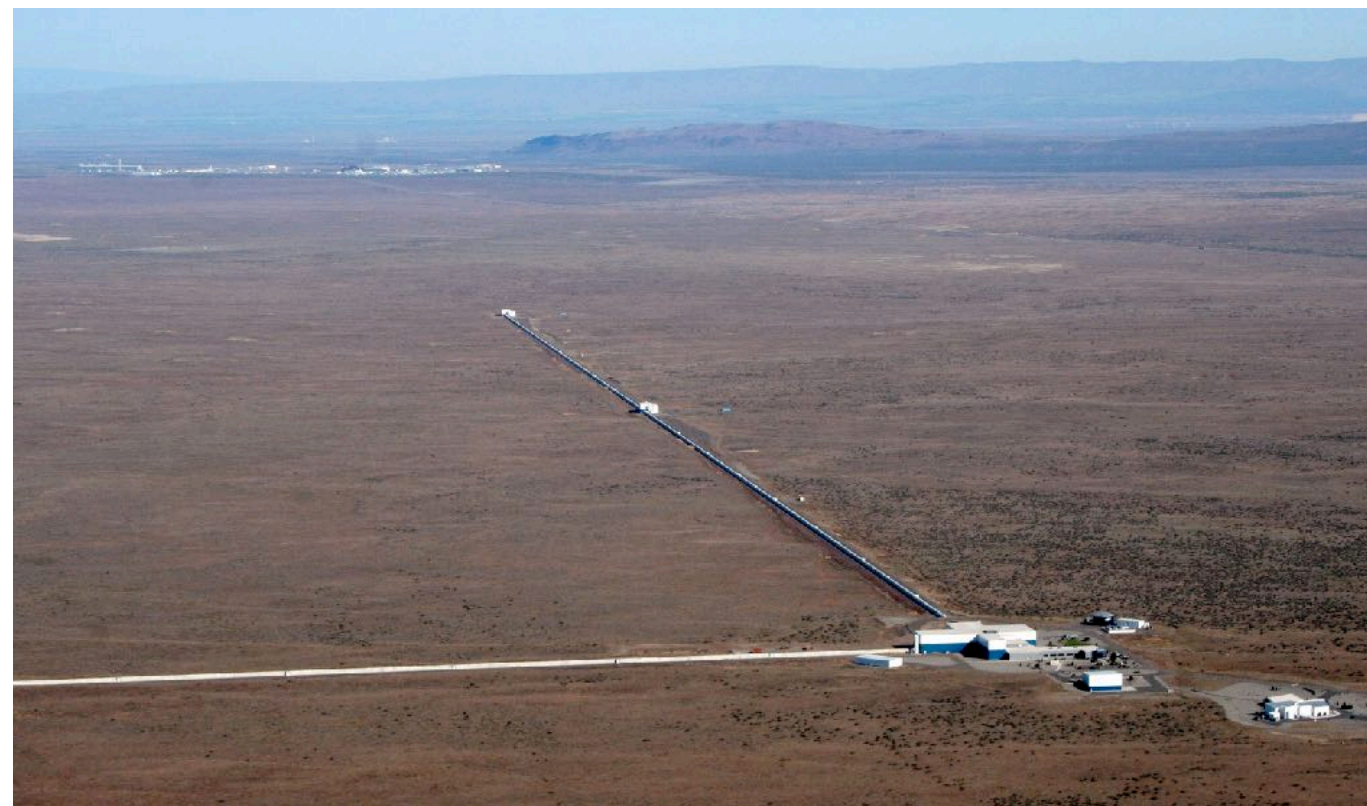


FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the 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.

世界の重力波天文台（レーザー干渉計）

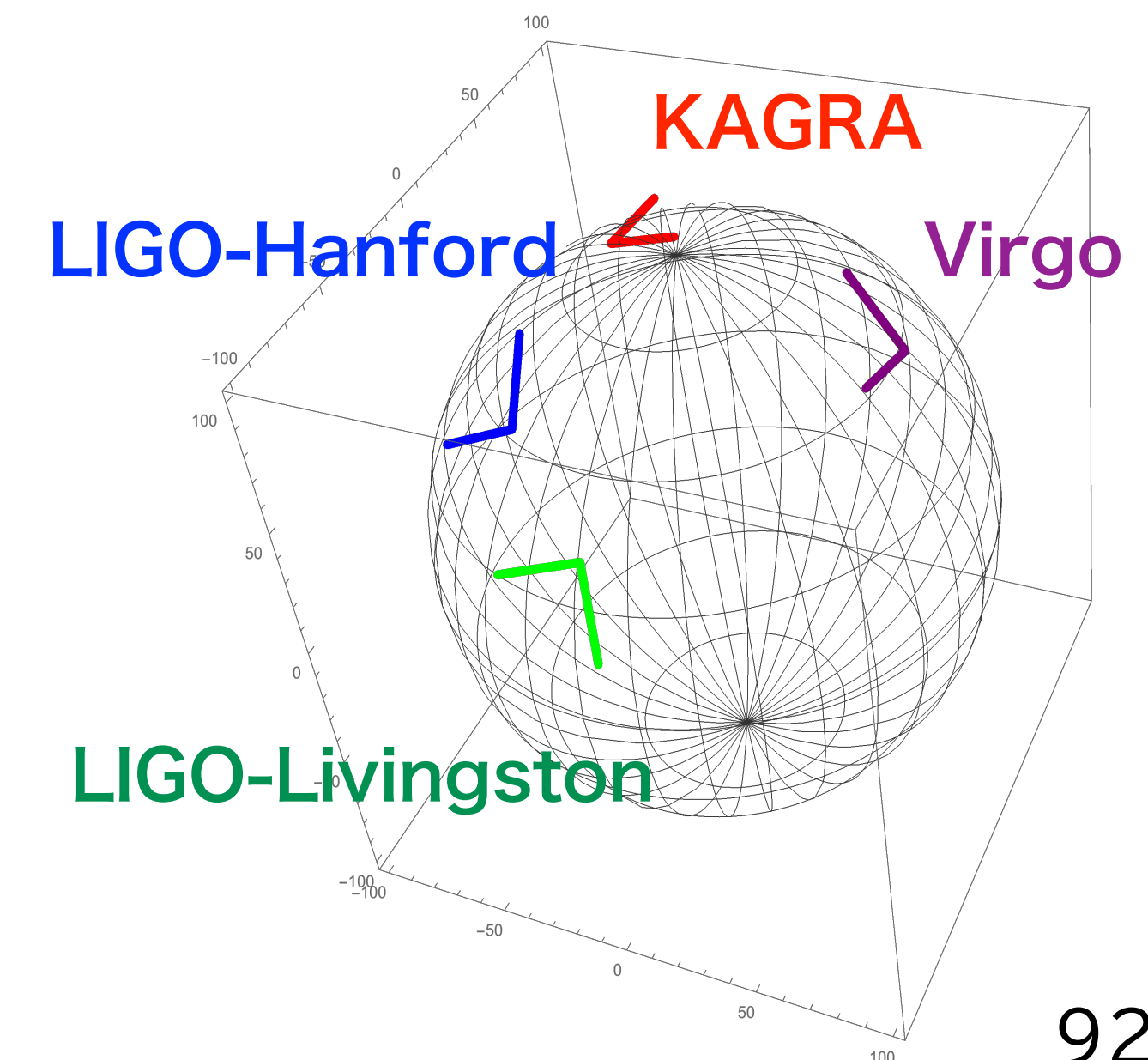
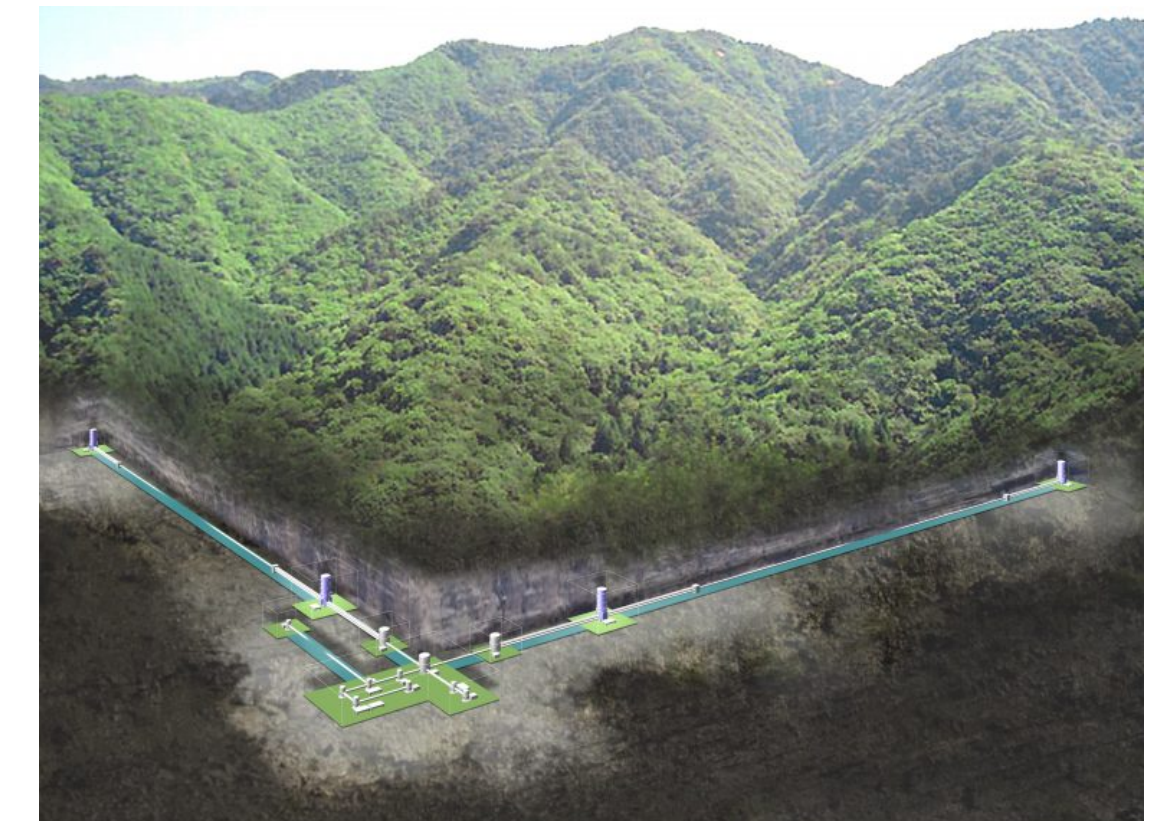
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)



重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

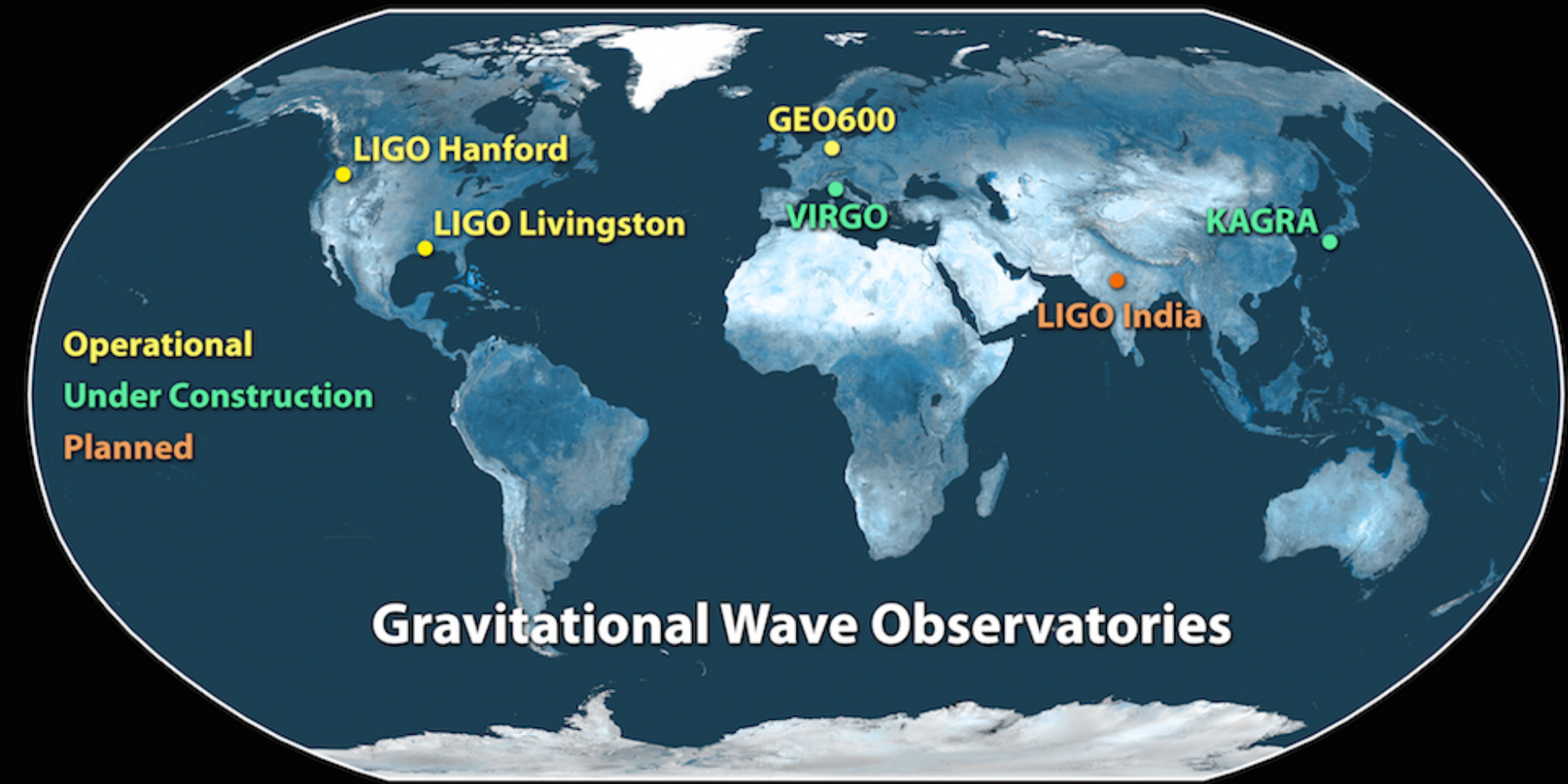
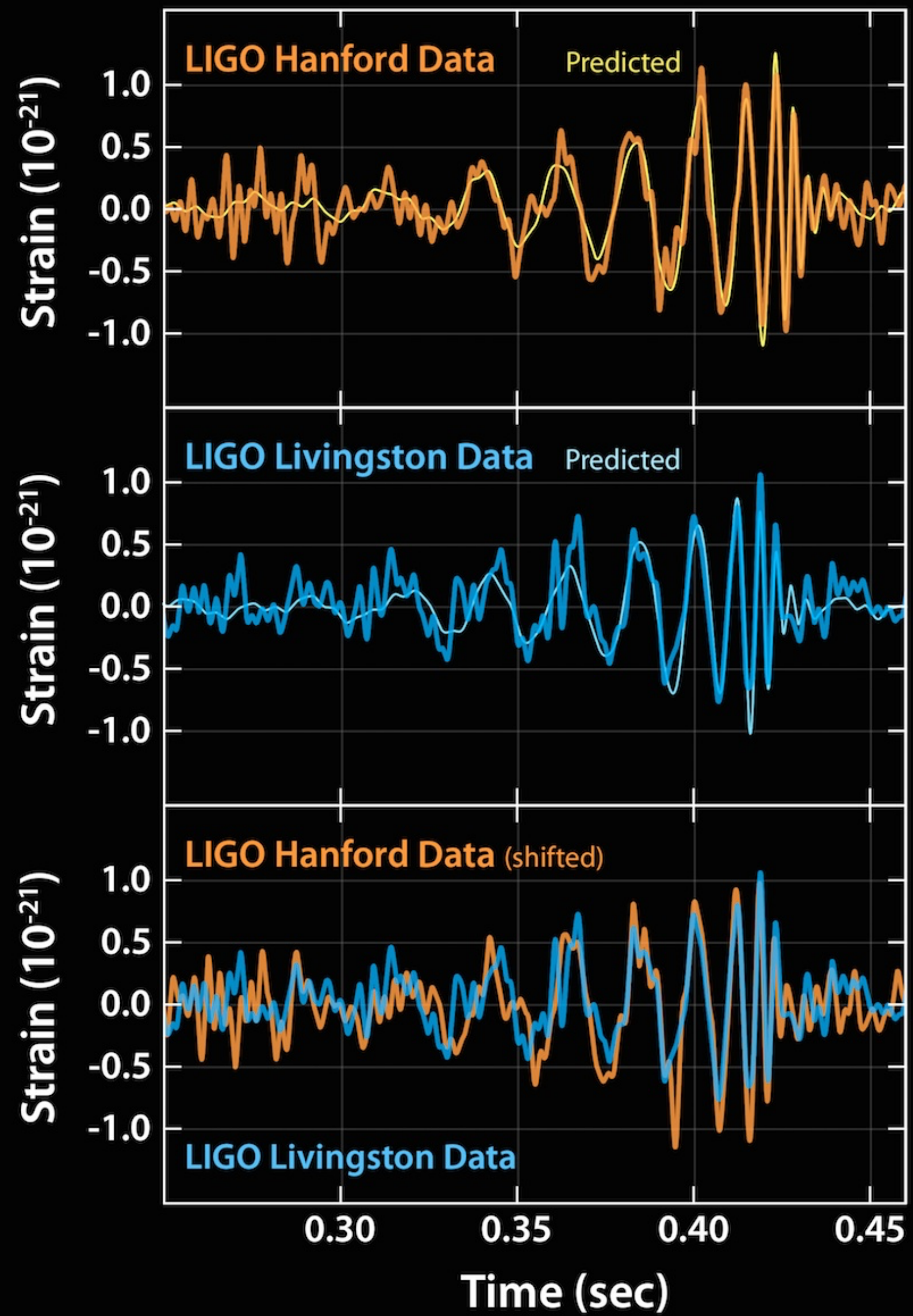


“We had detected gravitational waves. We did it.”

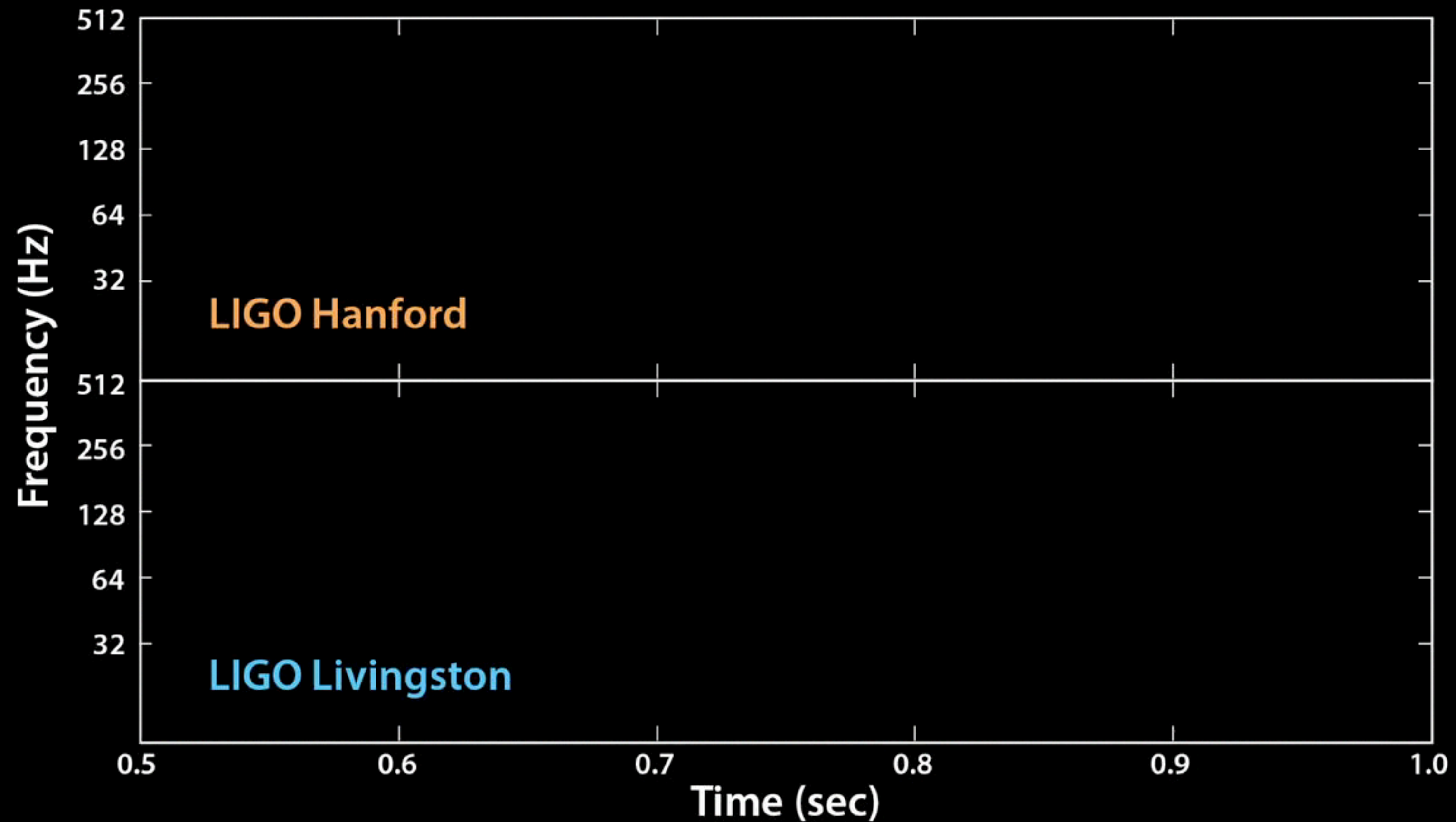
“我々は、重力波を検出した。 やり遂げたのだ。”

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

2015年9月14日



重力波波形を音にすると. . .



始め2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

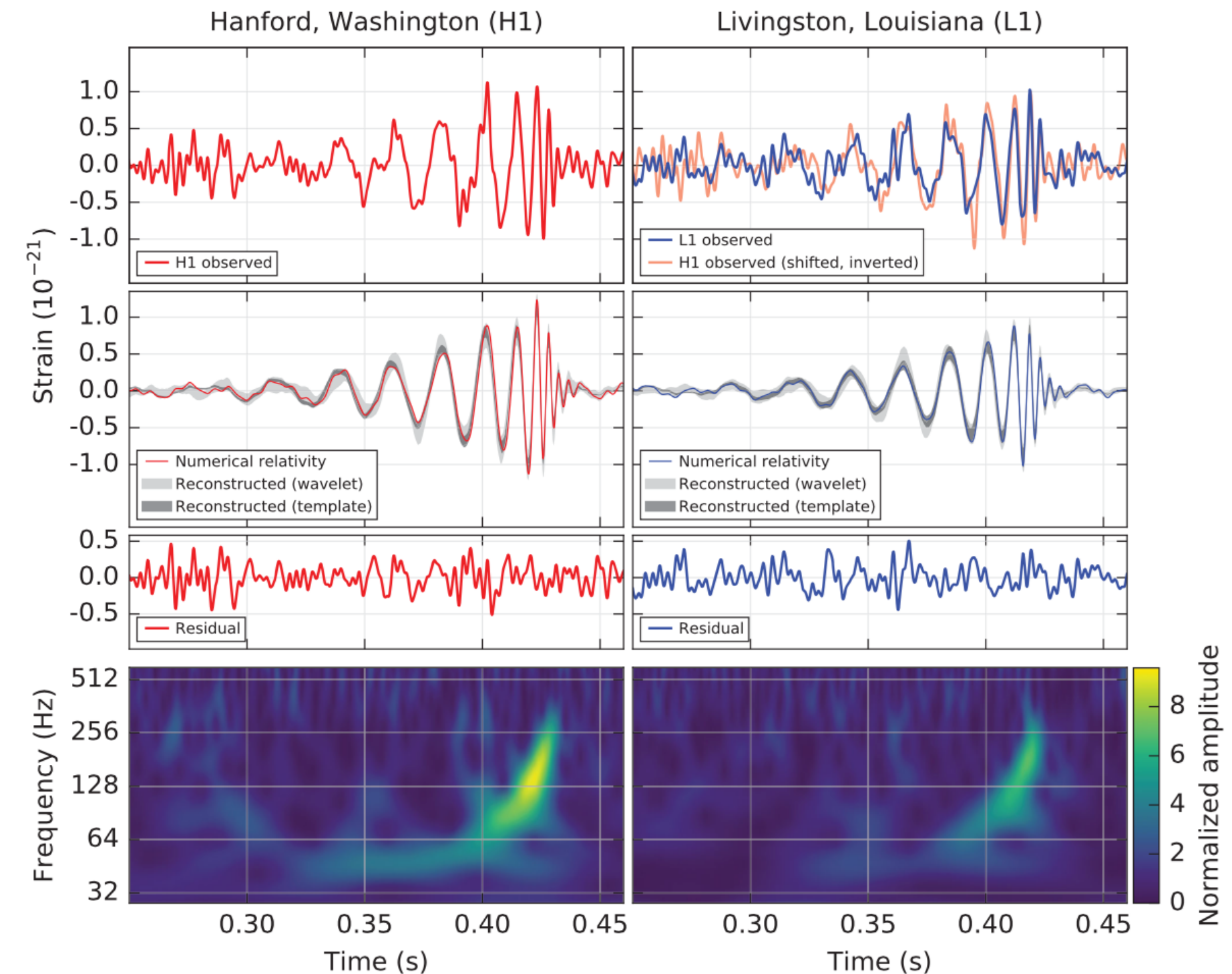


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered

N. Gehrels,⁶⁸ G. Gemme,⁴⁷ B. Gendre,⁵³ E. Genin,²⁴ A. Gennai,¹⁹ J. George,⁴⁸ L. Gergely,⁹⁶ V. Germain,⁷ Abhirup Ghosh,¹⁵ Archisman Ghosh,¹⁵ S. Ghosh,^{52,9} J. A. Giaime,^{2,6} K. D. Giardina,⁶ A. Giazotto,¹⁹ K. Gill,⁹⁷ A. Glaefke,⁶ J. R. Gleason,⁵ E. Goetz,⁹⁸ R. Goetz,⁵ L. Gondan,²⁴ G. González,² J. M. Gonzalez Castro,^{18,19} A. Gopakumar,⁹⁹ N. A. Gordon,³⁶ M. L. Gorodetsky,⁴⁹ S. E. Gossan,¹ M. Gosselin,³⁴ R. Gouaty,⁷ C. Graef,³⁶ P. B. Graff,⁶ M. Granata,⁶⁵ A. Grant,³⁶ S. Gras,¹⁰ C. Gray,³⁷ G. Greco,^{77,58} A. C. Green,⁴⁵ R. J. S. Greenhalgh,¹⁰⁰ P. Groot,⁵² H. Grote,⁸ S. Grunewald,²⁹ G. M. Guidi,^{27,58} X. Guo,²⁰ A. Gupta,¹⁴ M. K. Gupta,⁴⁵ K. E. Gushwa,¹ E. K. Gustafson,¹ R. Gustafson,⁹⁸ J. J. Hacker,²² B. R. Hall,⁵⁶ E. D. Hall,¹ G. Hammond,³⁶ M. Haney,⁵⁹ M. M. Hanke,¹ J. Hanks,²⁷ C. Hanna,⁷² M. D. Hannam,²¹ J. Hanson,⁶ T. Hardwick,² J. Harms,^{57,58} G. M. Harry,¹⁰¹ I. W. Harry,²⁹ M. J. Hart,³⁶ M. T. Hartman,⁵ C. J. Haster,⁴⁵ K. Haughian,³⁶ J. Healy,¹⁰² J. Heefner,^{1,4} A. Heidmann,⁶⁰ M. C. Heintze,^{5,6} G. Heinzl,⁸ H. Heitmann,⁵³ P. Hello,²³ G. Hemming,³⁴ M. Hendry,³⁶ I. S. Heng,³⁶ J. Hennig,³⁶ A. W. Heptonstall,¹ M. Heurs,^{8,17} S. Hild,³⁶ P. K. A. Hodge,⁷ D. Hofman,⁶⁵ S. E. Hollitt,¹⁰⁴ K. Holt,⁸ D. E. Holz,⁷⁵ P. Hopkins,⁹¹ D. J. Hosken,¹⁰⁴ J. Hough,³⁶ E. A. Houston,³⁶ E. J. Howell,²¹ Y. M. Hu,³⁶ S. Huang,⁷³ E. A. Huerta,^{105,82} D. Huet,²³ B. Hughey,⁹⁷ S. Husa,⁴⁶ S. H. Huttner,³⁶ T. Huynh-Dinh,⁸ A. Idriisy,⁷² N. Indik,⁸ D. R. Ingram,³⁷ R. Inta,⁷¹ H. N. Isa,³⁶ J.-M. Isac,⁶⁰ M. Isi,¹ G. Islas,²² T. Isogai,¹⁰ B. R. Iyer,¹⁵ K. Izumi,³⁷ M. B. Jacobson,¹ T. Jacqmin,⁶⁰ H. Jang,⁷⁷ K. Jani,⁶³ P. Jaranowski,¹⁰⁶ S. Jawahar,¹⁰⁷ F. Jiménez-Forzeza,⁶⁶ W. W. Johnson,² N. K. Johnson-McDaniel,¹⁵ D. I. Jones,²⁶ R. Jones,³⁶ R. J. G. Jonker,⁹ L. Ju,⁵¹ K. K. Harris,¹⁰⁸ C. V. Kalaghatgi,^{24,91} V. Kalogera,⁸² S. Kandhasamy,²¹ G. Kang,⁷⁷ J. B. Kanner,⁵ S. Karli,⁵⁹ M. Kasprzak,¹ E. Katsavounidis,¹⁰ W. Katzman,⁸ S. Kaufer,¹⁷ T. Kaur,⁵¹ K. Kawabe,³⁷ F. Kawazoe,^{8,17} F. Kéfélian,⁵³ M. S. Kehl,⁴⁹ D. Keitel,⁶⁶ D. B. Kelley,³⁵ W. Kells,¹ R. Kennedy,⁴⁹ D. G. Keppel,⁸ J. S. Key,⁸³ A. Khalaïdovski,⁸ F. Y. Khalili,⁴⁹ I. Khan,¹² S. Khan,⁹¹ Z. Khan,⁹¹ E. A. Khazanov,¹⁰⁹ N. Kijbunchoo,³⁷ C. Kim,¹¹⁰ K. Kim,¹¹⁰ Nam-Gyu Kim,⁷⁷ Namjun Kim,⁴⁰ Y.-M. Kim,¹¹⁰ E. J. King,¹⁰⁴ P. J. King,³⁷ D. L. Kinzel,⁸ J. S. Kissel,³⁷ L. Kleybolte,²⁷ S. Klimenko,⁵ M. S. Koehlenbeck,⁸ K. Kokeyama,² S. Koley,⁹ V. Kondrashov,¹ A. Kontos,¹⁰ S. Koranda,¹⁶ M. Korobko,²⁷ W. Z. Korth,¹ I. Kowalska,⁴⁴ D. B. Kobak,¹ V. Kringer,⁶⁷ B. Krishnan,⁸ A. Królak,^{112,113} C. Krueger,¹⁷ G. Kuehn,⁹ P. Kumar,⁸ R. Kumar,³⁶ L. Kuo,⁷³ A. Kutniya,¹¹² P. Kwee,⁸ B. D. Lackey,⁶⁰ M. Landry,³⁷ J. Lange,¹⁰² B. Lantz,⁴⁰ P. D. Lasky,¹¹⁴ A. Lazzarini,¹ C. Lazzaro,^{60,42} P. Leaci,^{29,78} S. Leavey,³⁶ E. O. Lebigot,^{30,70} C. H. Lee,¹¹⁰ H. K. Lee,¹¹¹ H. M. Lee,¹¹⁵ K. Lee,³⁶ A. Lenon,³⁵ M. Leonard,^{89,90} J. R. Leong,⁸ N. Leroy,²³ N. Letendre,⁷ Y. Levin,¹¹⁴ B. M. Levine,³⁷ T. G. F. Li,¹ A. Libson,¹⁰ T. B. Littenberg,¹¹⁶ N. A. Lockerbie,¹⁰⁷ J. Logue,³⁶ A. L. Lombardi,¹⁰³ L. T. London,⁹¹ J. E. Lord,⁵¹ M. Lorenzini,^{12,13} V. Lorette,¹¹⁷ M. Lomard,⁶ G. Losurdo,⁵⁸ J. D. Lough,^{8,17} C. O. Lousto,¹⁰² G. Lovelace,²² H. Lück,^{17,8} A. P. Lundgren,⁸ J. Luo,⁷⁸ R. Lynch,¹⁰ Y. Ma,⁵¹ T. MacDonald,⁴⁰ B. Machenschalk,⁸ M. MacInnis,¹⁰ D. M. Macleod,⁷ F. Magaña-Sandoval,³⁵ R. M. Magee,⁵⁶ M. Magewaran,¹ E. Majorana,²⁸ I. Maksimovic,¹¹⁷ V. Malvezzi,^{25,13} N. Man,⁵³ I. Mandel,⁵³ V. Mandic,⁸⁴ V. Mangano,⁴⁶ G. L. Mansell,²⁰ M. Manske,¹⁶ M. Mantovani,³⁴ F. Marchesoni,^{118,33} F. Marion,⁷ S. Márka,³⁹ Z. Márka,³⁹ A. S. Markosyan,⁴⁰ E. Maros,¹ F. Martelli,^{57,58} L. Martellini,⁵³ I. W. Martin,³⁶ R. M. Martin,⁵³ D. V. Martynov,¹ J. N. Marx,¹ K. Mason,¹⁰ A. Masserot,⁷ T. J. Massinger,³⁵ M. Masso-Reid,³⁶ F. Matichard,¹⁰ L. Matone,³⁹ N. Mavalvala,¹⁰ N. Mazumder,³⁶ G. Mazzolo,⁸ R. McCarthy,³⁷ D. E. McClelland,²⁰ S. McCormick,⁶ S. C. McGuire,¹¹⁹ G. McIntyre,¹ J. McIver,¹ D. J. McManus,⁹⁷ D. T. McWilliams,¹⁰⁵ D. Meacher,⁷² G. D. Meadors,^{29,8} J. Meidam,⁴ C. Melatos,⁵⁵ G. Mendell,³⁷ D. Mendoza-Gandara,⁸ R. A. Mercer,¹⁶ E. Merilh,³⁷ M. Merzougui,⁵³ S. Meshkov,¹ C. Messenger,³⁶ C. Messick,⁷² P. M. Meyers,⁸⁴ F. Mezzani,^{28,79} H. Miao,⁴⁵ C. Michel,⁶⁹ H. Middleton,⁴⁵ E. E. Mikhailov,¹²⁰ L. Milano,^{67,4} J. Miller,¹⁰ M. Millhouse,⁵¹ Y. Minenkov,¹³ J. Ming,²⁸ S. Mirshekari,¹²¹ C. Mishra,¹⁵ S. Mitra,¹⁴ V. P. Mitrofanov,⁴⁹ G. Mitselmakher,⁵ R. Mittleman,¹⁰ A. Moggi,¹⁹ M. Mohan,³⁴ S. R. P. Mohapatra,¹⁰ M. Montani,^{57,58} B. C. Moore,⁸⁸ C. J. Moore,¹²² D. Moraru,³⁷ G. Moreno,³⁷ S. R. Morris,⁸³ K. Mossavi,⁸ B. Mours,⁷ C. M. Mow-Lowry,⁴⁵ C. L. Mueller,⁵ G. Mueller,⁴ A. W. Muir,⁹¹ Arunava Mukherjee,¹⁶ D. Mukherjee,¹⁶ S. Mukherjee,¹⁶ N. Mukund,¹⁴ A. Mullavey,⁷ J. Munch,¹⁰⁴ D. J. Murphy,³⁹ P. G. Murray,³⁶ A. Mytidis,¹ I. Nardecchia,^{25,13} L. Naticchioni,^{79,28} R. K. Nayak,¹²³ V. Necula,⁵ K. Nedkova,¹⁰³ G. Nelemans,^{52,9} M. Neri,^{16,47} A. Neunzert,⁹⁸ G. Newton,³⁶ T. T. Nguyen,²⁰ A. B. Nielsen,⁸ S. Nissanke,^{52,9} A. Nitz,⁷ F. Nocera,³⁴ D. Nolting,⁶⁰ M. E. N. Normandin,⁸³ L. K. Nuttall,³⁵ J. Oberling,³⁷ E. Ochsner,¹⁶ J. O'Dell,¹⁰⁰ E. Oelker,¹⁰ G. H. Oggin,¹²⁴ J. J. Oh,¹²⁵ S. H. Oh,¹²⁵ F. Ohme,⁹¹ M. Oliver,⁶⁶ P. Oppermann,⁸ Richard J. Oram,⁶ B. O'Reilly,⁶ R. O'Shaughnessy,¹⁰² C. D. Ott,⁷⁶ D. J. Ottaway,¹⁰⁴ R. S. Ottens,⁵ H. Overmier,⁶ B. J. Owen,⁷¹ A. Pai,¹⁰⁸ S. A. Pai,⁴⁸ J. R. Palamos,⁹⁰ O. Palashov,² C. Palomba,²⁶ A. Pal-Singh,²⁷ H. Pan,⁷ Y. Pan,⁶² C. Pankow,⁵² F. Pannarale,⁹¹ B. C. Pant,⁴⁸ F. Paoletti,^{34,19} A. Paoli,²⁴ M. A. Papa,^{29,16,8} H. R. Paris,⁴⁰ W. Parker,⁸ D. Pascucci,²⁶ A. Pasqualetti,¹⁹ R. Passaquetti,^{18,19} D. Passuello,¹⁹ B. Patricelli,^{18,19} Z. Patrick,⁴⁰ B. L. Pearlstone,³⁶ M. Pedraza,¹ R. Pedurand,⁶⁵ L. Pekowsky,³⁵ A. Pele,⁶ S. Penn,¹²⁶ A. Perreca,⁵¹ H. P. Pfeiffer,^{69,29} M. Phelps,³⁶ O. Piccinni,^{79,28} M. Pichot,⁵³ M. Pickenpack,⁸ F. Piergiovanni,^{57,58}

V. Pierro,⁴⁷ G. Pillant,³⁴ L. Pinard,⁶⁵ I. M. Pinto,⁸⁷ M. Pitkin,³⁶ J. H. Poeld,⁸ R. Poggiani,^{18,19} P. Popolizio,²⁴ A. Post,⁸ J. Powell,³⁶ J. Prasad,¹⁴ V. Predoi,⁹¹ S. S. Premachandra,¹¹⁴ T. Prestegard,⁸⁴ L. R. Price,¹ M. Prijatelj,³⁴ M. Principe,⁸⁷ S. Privitera,²⁹ R. Prix,⁸ G. A. Prodi,^{89,90} L. Prokhorov,⁴⁹ O. Puncken,⁸ M. Punturo,³³ P. Puppo,²⁸ M. Pürer,²⁹ H. Qi,¹⁶ J. Qin,⁵¹ V. Quetschke,⁸³ E. A. Quintero,¹ R. Quitzow-James,⁵⁹ F. J. Raab,³⁷ D. S. Rabeling,²⁰ H. Radkins,³⁷ P. Raffai,⁵⁴ S. Raja,⁴⁸ M. Rakhmanov,⁵³ C. R. Ramet,⁶ P. Rapagnani,^{79,28} V. Raymond,²⁹ M. Razzano,^{8,19} V. Re,²⁹ J. Read,²² C. M. Reed,³⁷ T. Regimbau,⁵³ L. Rei,⁴⁷ S. Reid,⁵⁰ D. H. Reitze,^{1,5} H. Rev,¹²⁰ S. D. Reyes,³⁵ F. Ricci,^{79,28} K. Riles,⁹⁸ N. A. Robertson,¹³⁶ R. Robie,³⁶ F. Robinet,²³ A. Rocchi,¹³ L. Rolland,⁷ J. G. Rollins,¹ V. J. Roma,⁵⁹ J. D. Romano,⁸³ R. Romano,^{3,4} G. Romanov,¹²⁰ J. H. Romie,⁶ D. Rosińska,^{127,43} S. Rowan,³⁶ A. Rüdiger,⁸ P. Ruggeri,³⁴ K. Ryan,³⁷ S. Sachdev,⁷ T. Sadecki,³⁷ L. Sadeghian,¹⁶ L. Salconi,³⁴ M. Saleem,¹⁰⁸ F. Salemi,⁸ A. Samajdar,¹²³ L. Sammut,^{85,114} L. M. Sampson,⁸² E. J. Sanchez,¹ V. Sandberg,³⁷ B. Sandeen,⁸² G. H. Sanders,¹ J. R. Sanders,^{98,35} B. Sassolas,⁶⁵ B. Sathyaprakash,⁹¹ P. R. Saulson,³⁵ O. Sauter,⁹⁸ R. L. Savage,⁹ A. Sawadsky,¹⁷ P. Schale,²⁹ R. Schilling,^{8,3} J. Schmidt,⁸ P. Schmidt,^{1,76} R. Schnabel,²⁷ R. M. S. Schofield,⁵⁹ A. Schönbeck,²⁷ E. Schreiber,⁸ D. Schuette,^{8,17} B. F. Schutz,^{91,29} J. Scott,³⁶ S. M. Scott,²⁰ D. Sellers,⁶ A. S. Sengupta,⁹⁴ D. Sentenac,³⁴ V. Sequino,^{25,13} A. Sergeev,¹⁰⁹ G. Sema,²² Y. Setyawati,^{52,9} A. Sevigny,²⁷ D. A. Shaddock,²⁰ T. Shaffer,³⁷ S. Shah,^{52,9} M. S. Shahriar,⁸² M. Shaltev,⁸ Z. Shao,¹ B. Shapiro,⁴⁰ P. Shawhan,⁶² A. Sheperd,¹⁶ D. H. Shoemaker,¹⁰ D. M. Shoemaker,⁶³ K. Siellez,^{53,63} X. Siemens,¹⁶ D. Sigg,³⁷ A. D. Silva,¹¹ D. Simakov,⁸ A. Singer,¹ L. P. Singer,⁶⁸ A. Singh,^{29,8} R. Singh,² A. Singhal,¹² A. M. Sintès,⁶⁶ B. J. J. Slagmolen,²⁹ J. R. Smith,⁴⁹ M. R. Smith,¹ N. D. Smith,⁸ R. J. E. Smith,⁸ E. J. Son,¹²⁵ B. Sorazu,¹⁶ F. Sorrentino,⁴⁷ T. Souradeep,¹⁴ A. K. Srivastava,⁴⁵ A. Staley,³⁹ M. Steinke,⁸ J. Steinlechner,³⁶ S. Steinlechner,³⁶ D. Steinmeyer,^{8,17} B. C. Stephens,¹⁶ S. P. Stevenson,⁴⁵ R. Stone,⁸³ K. A. Strain,³⁶ N. Straniero,⁶⁵ G. Stratta,^{57,58} N. A. Strauss,⁷⁸ S. Strigin,⁴⁹ R. Sturani,¹²¹ A. L. Stuver,⁶ T. Z. Summerscales,¹²⁸ L. Sun,⁶⁵ P. J. Sutton,⁹¹ B. L. Swinkels,²⁴ M. J. Szczepańczyk,⁹⁷ M. Taceo,³⁰ D. Talukder,⁵⁹ D. B. Tanner,³⁶ M. Tápai,³⁶ S. P. Tarabrin,⁸ A. Tarachchir,²⁰ R. Taylor,¹ J. Theeg,⁸ M. P. Thirugnanasambandam,¹ E. G. Thomas,⁴⁵ M. Thomas,⁶ P. Thomas,³⁷ K. A. Thorne,⁶ K. S. Thorne,⁷⁶ E. Thrane,¹¹⁴ S. Tiwari,¹² V. Tiwari,⁹¹ K. V. Tokmakov,⁸ C. Tomlinson,⁸⁶ M. Tonelli,^{18,19} C. V. Torres,^{83,6} C. T. Torricelli,⁸ D. Töyrä,⁴⁵ F. Travasso,^{32,33} G. Traylor,⁶ D. Trifiro,²¹ M. C. Tringali,¹⁰ L. Trozzo,^{129,19} M. Tse,¹⁹ M. Turcotti,⁵³ D. Tuyenbayev,⁸³ D. Ugolini,¹³⁰ C. S. Unnikrishnan,⁹⁹ A. L. Urban,¹⁶ S. A. Usman,³⁵ H. Vahlbruch,¹⁷ G. Vajente,¹ G. Valdes,⁸³ M. Vallisneri,⁷⁶ N. van Bakel,⁹ M. van Beuzekom,⁹ J. F. J. van den Brand,^{61,9} C. Van Den Broeck,⁹ D. C. Vander-Hyde,^{25,22} L. van der Schaaf,⁹ J. V. van Heijningen,⁹ A. A. van Veggel,³⁶ M. Vardaro,^{41,42} S. Vass,¹ M. Vasúth,³⁸ R. Vaulin,¹⁰ A. Vecchio,⁴ G. Vedovato,⁴² J. Veitch,⁴⁵ P. J. Veitch,¹⁰⁴ K. Venkateswara,¹³¹ D. Verkindt,⁷ F. Vetrano,^{57,58} A. Viceré,^{27,58} S. Vinciguerra,⁴⁵ D. J. Vine,⁵⁰ J.-Y. Vinet,⁵³ S. Vitale,¹⁰ T. Vo,³⁵ H. Vocca,^{32,33} C. Vorvick,³⁷ D. Voss,⁵ W. D. Voudsen,⁴⁵ S. P. Vyatchanin,⁴⁹ A. R. Wade,²⁰ L. E. Wade,¹³² M. Wade,¹³² S. J. Waldman,¹⁰ M. Walker,² L. Wallace,¹ S. Walsh,^{16,8,29} G. Wang,¹² H. Wang,⁴⁵ M. Wang,⁴⁵ X. L. Wang,³⁷ Ward,³⁶ R. L. Ward,²⁰ J. Warner,³⁷ M. Was,⁷ B. Weaver,³⁷ L.-W. Wei,⁵³ M. Weinert,⁸ A. J. Weinstein,¹ R. Weiss,¹⁰ T. Welborn,⁶ L. Wen,⁵¹ P. Weßels,⁸ T. Westphal,⁸ K. Wette,⁸ J. T. Whelan,^{102,8} S. E. Whitcomb,¹ D. J. White,⁸⁶ B. F. Whiting,⁸ K. Wiesner,⁸ C. Wilkinson,³⁷ P. A. Willems,¹ L. Williams,⁵ R. D. Williams,¹ A. R. Williamson,⁹¹ J. L. Willis,¹³³ B. Willke,^{17,8} M. H. Wimmer,^{8,17} L. Winkelmann,⁸ W. Winkler,⁸ C. C. Wipf,¹ A. G. Wiseman,¹⁶ H. Wittel,^{8,17} G. Woan,³⁶ J. Worden,³⁷ J. L. Wright,³⁶ G. Wu,⁶ J. Yablon,⁸² I. Yakushin,⁶ W. Yam,¹⁰ H. Yamamoto,¹ C. C. Yancey,⁶² M. J. Yap,²⁰ H. Yu,¹⁰ M. Yvert,¹ A. Zadrozny,¹¹² L. Zangrando,⁴² M. Zanolin,⁹⁷ J.-P. Zenderi,⁴² M. Zevin,⁶² F. Zhang,¹⁰ L. Zhang,¹ M. Zhang,¹²⁰ Y. Zhang,¹⁰² C. Zhao,⁵¹ M. Zhou,⁸² Z. Zhou,⁸² X. J. Zhu,⁵¹ M. E. Zucker,¹¹⁰ S. E. Zuurav,¹⁰³ and J. Zweizig¹

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

¹LIGO, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA

²Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803, USA

³Università di Salerno, Fisciano, I-84084 Salerno, Italy

⁴INFN, Sezione di Napoli, Complesso Universitario di Monte S. Angelo, I-80126 Napoli, Italy

⁵University of Florida, Gainesville, Florida 32611, USA

⁶LIGO Livingston Observatory, Livingston, Louisiana 70754, USA

⁷Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules (LAPP), Université Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, F-74941 Annecy-le-Vieux, France

⁸Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, D-30167 Hannover, Germany

⁹Nikhef, Science Park, 1098 XG Amsterdam, Netherlands

¹²⁷Janusz Gil Institute of Astronomy, University of Zielona Góra, 65-265 Zielona Góra, Poland

¹²⁸Andrews University, Barrie Springs, Michigan 49104, USA

¹²⁹Università di Siena, I-53100 Siena, Italy

¹³⁰Trinity University, San Antonio, Texas 78212, USA

¹³¹University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA

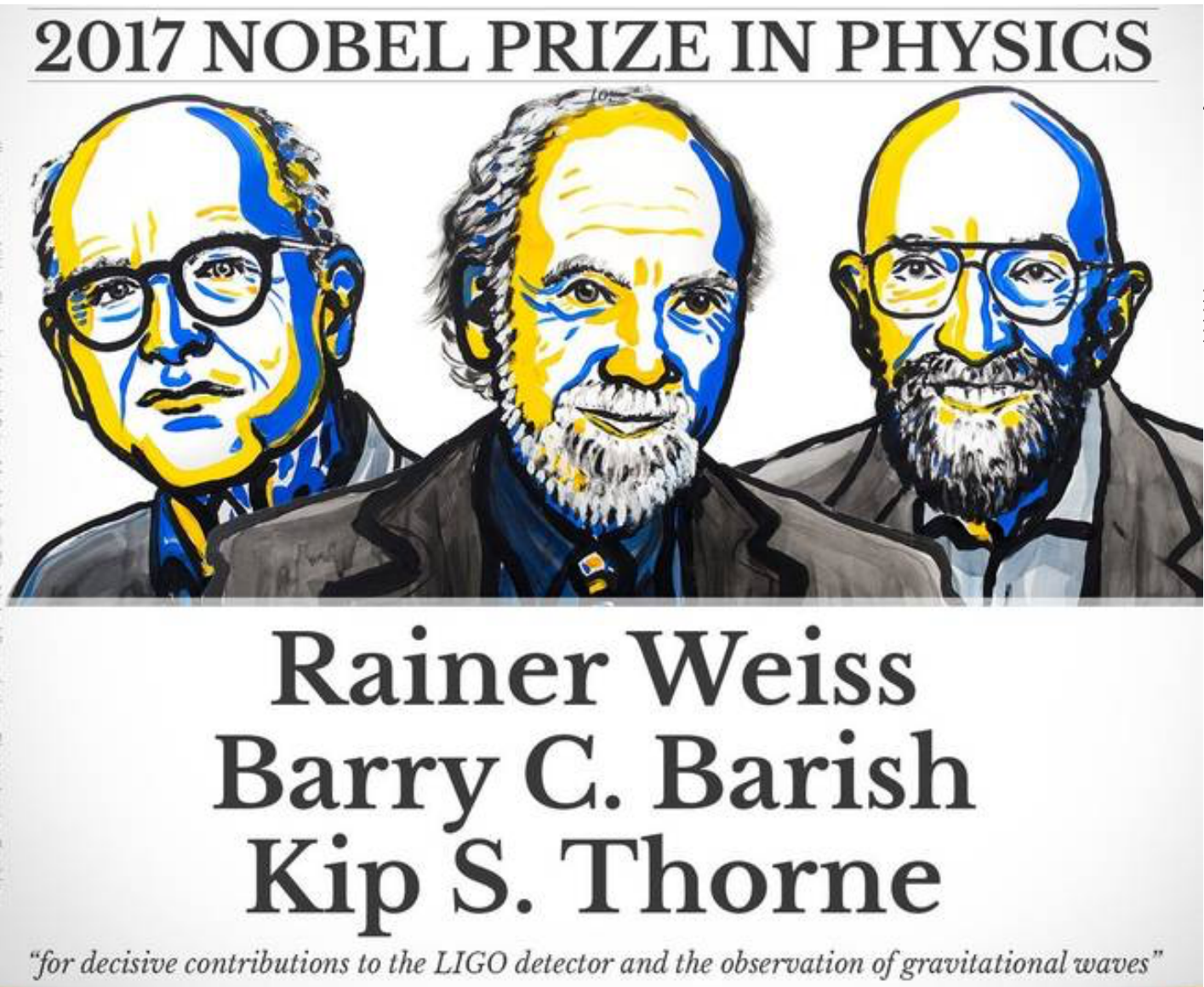
¹³²Kenyon College, Gambier, Ohio 43022, USA

¹³³Abilene Christian University, Abilene, Texas 79699, USA

Deceased, April 2012.

Deceased, May 2015.

Deceased, March 2015.



¹⁰LIGO, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

¹¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 12227-010 São José dos Campos, São Paulo, Brazil

¹²INFN, Gran Sasso Science Institute, I-67100 L'Aquila, Italy

¹³INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy

¹⁴Inter-University Centre for Astrophysics and Astrophysics, Pune 411007, India

¹⁵International Centre for Theoretical Sciences, Tata Institute of Fundamental Research, Bangalore 560012, India

¹⁶University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin 53201, USA

¹⁷Leibniz Universität Hannover, D-30167 Hannover, Germany

¹⁸Università di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

¹⁹INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

²⁰Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 0200, Australia

²¹The University of Mississippi, University, Mississippi 38677, USA

²²California State University Fullerton, Fullerton, California 92831, USA

²³LAL, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay, France

²⁴Chennai Mathematical Institute, Chennai, India 603103

²⁵Università di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, Italy

²⁶University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

²⁷Universität Hamburg, D-22761 Hamburg, Germany

²⁸INFN, Sezione di Roma, I-00185 Roma, Italy

²⁹Albert-Einstein-Institut, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, D-14476 Potsdam-Golm, Germany

³⁰APC, AstroParticule et Cosmologie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/IF, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, F-75205 Paris Cedex 13, France

³¹Montana State University, Bozeman, Montana 59717, USA

³²Università di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

³³INFN, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

³⁴European Gravitational Observatory (EGO), I-56021 Cascina, Pisa, Italy

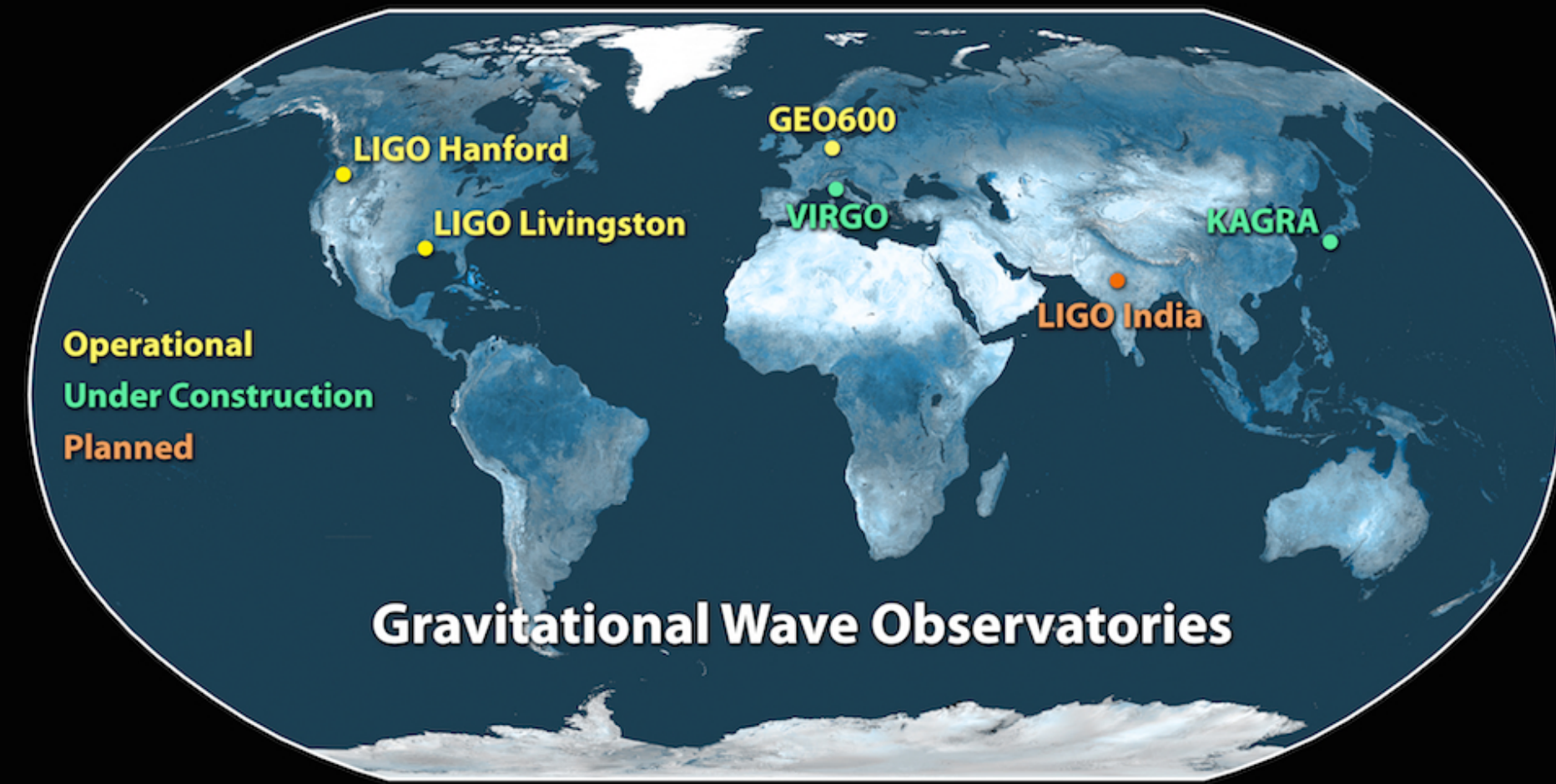
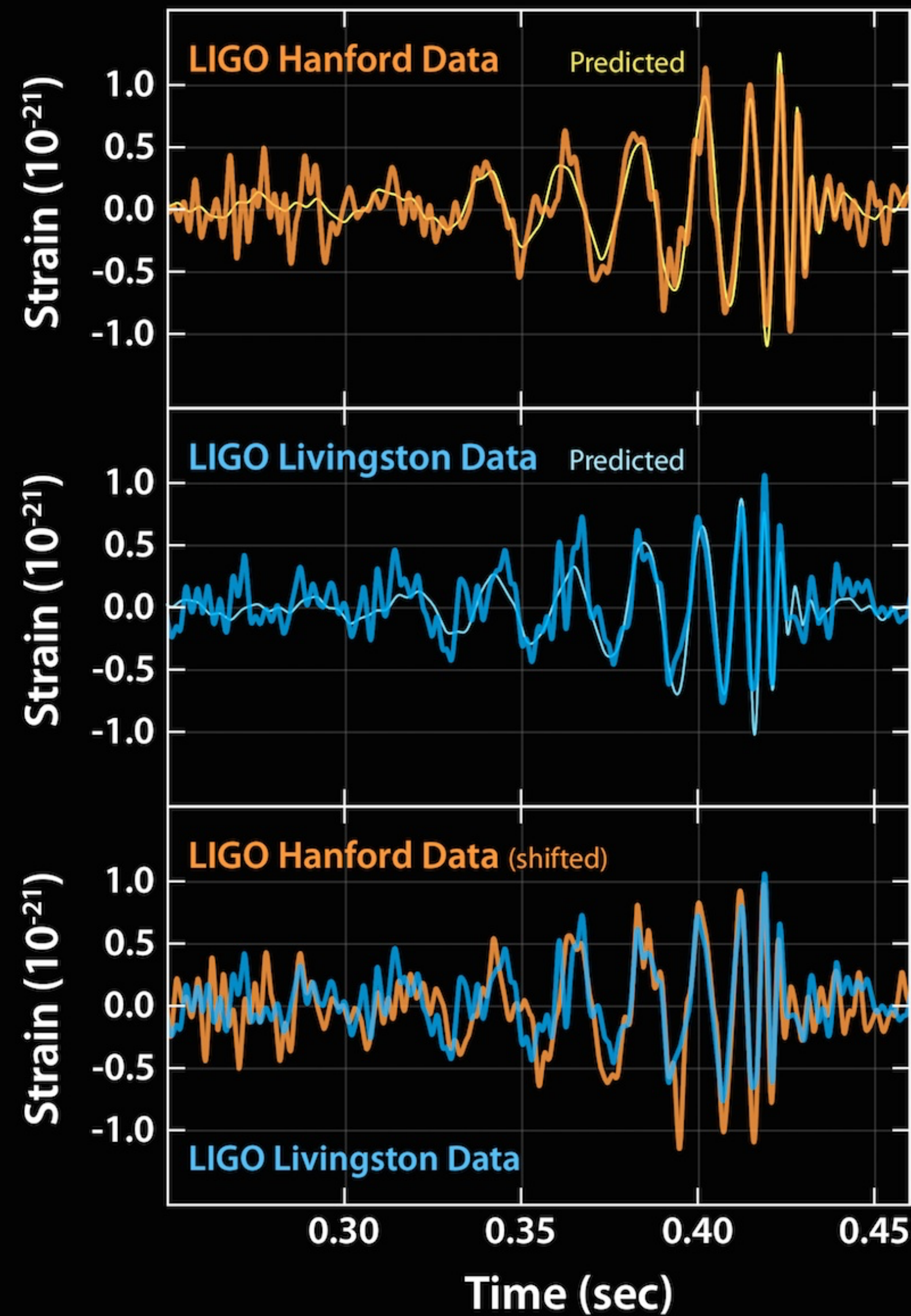
³⁵Syracuse University, Syracuse, New York 13244, USA

³⁶SUPA, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

³⁷LIGO Hanford Observatory, Richland, Washington 99352, USA

³⁸Wigner RCP, RMKI, H-1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33, Hungary

2015年9月14日

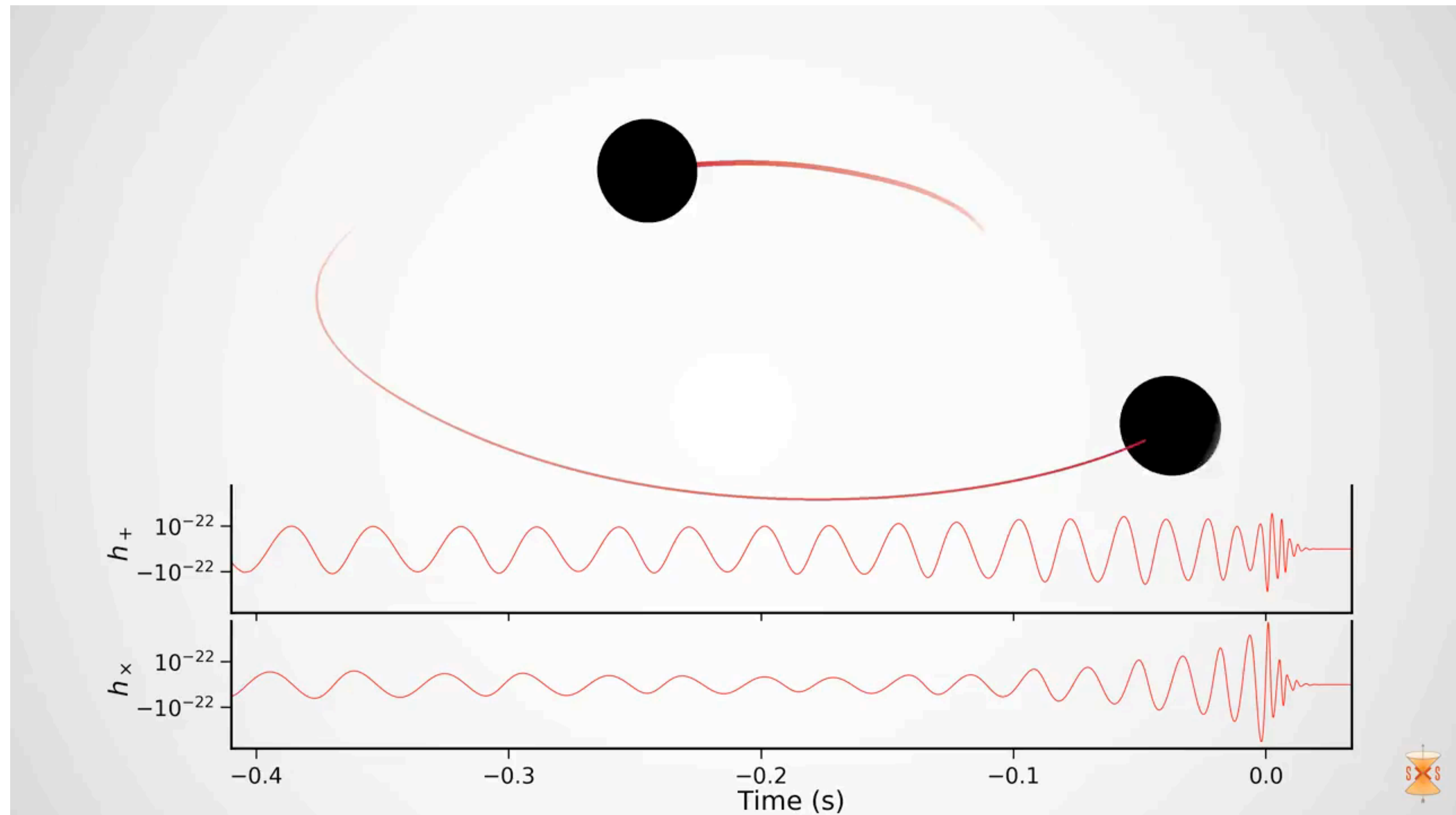


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先



Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown black holes are spinning, and angular momentum is exchanged among the two black holes and with the orbit. This results in a quite dramatic change in the orientation of the orbital plane, clearly visible in the movie. Furthermore, the spin-axes of the black holes change, as visible through the colored patch on each black hole horizon, which indicates the north pole.

The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation of the orbital plane and its change during the inspiral. Presently, LIGO can only measure one of the polarizations and therefore obtains only limited information about the orientation of the binary. This disadvantage will be remedied with the advent of additional gravitational wave detectors in Italy, Japan and India.

Finally, the slowed-down replay of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the distortion of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is "kicked" by the emitted gravitational waves, and moves upward. (Credit: A. Babul/H. Pfeiffer/CITA/SXS.) - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf>

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

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)



きけ 距て すのそす 変る伸、波 則ら プ G 形を

ブラックホール 解明に期待

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。

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



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！
ブラックホール連星が存在した！
相対性理論、正しかった！

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・大阪市立大学大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらう狙い。学生ら約1000人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【畠山哲郎】



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

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

重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさき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」

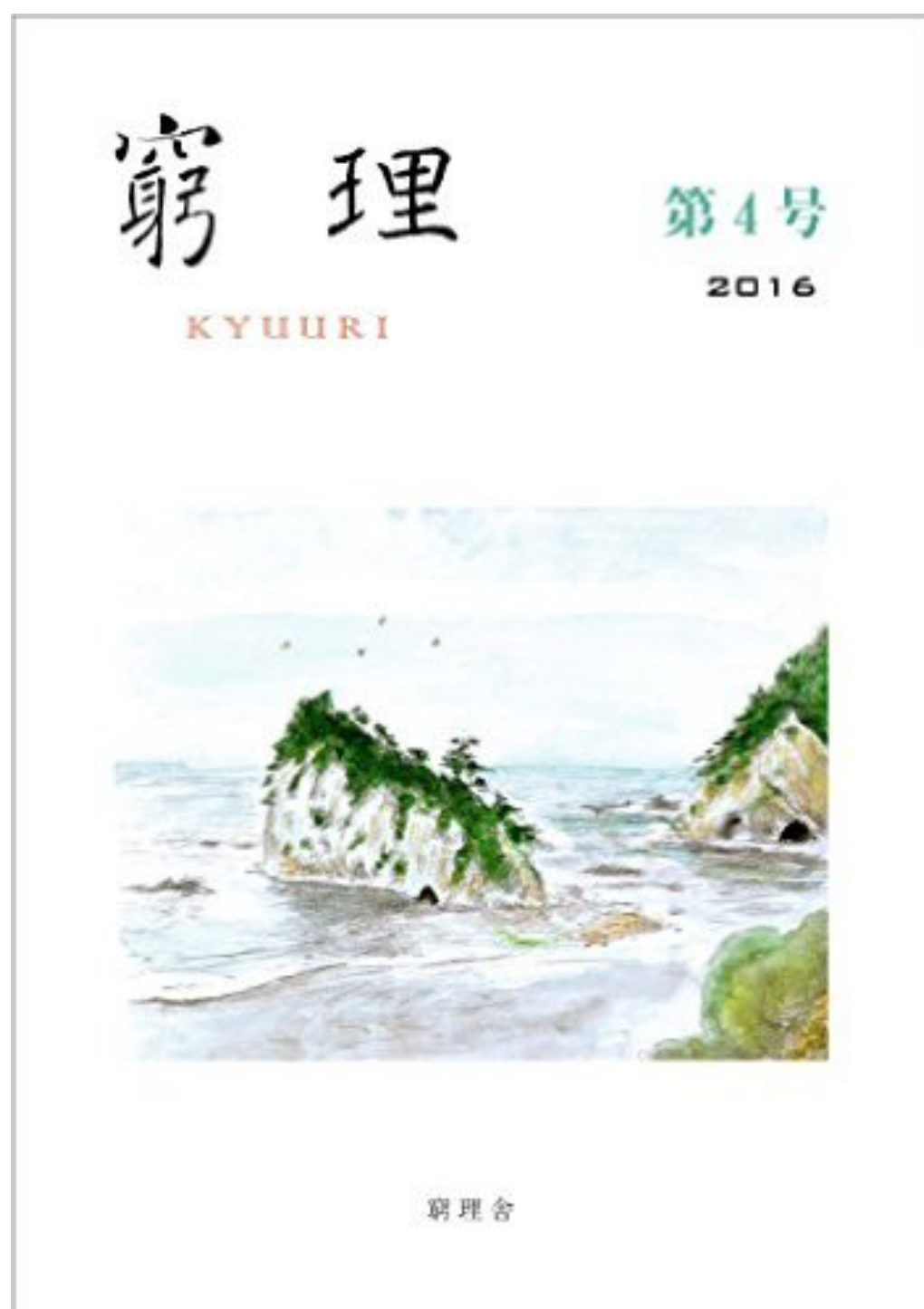
大阪工業大情報科学部の真貝寿明教授(一般相対性理論)は「祝・重力波の直接検出」と題して、研究室のウェブページに一般向けの緊急解説記事を掲載した。昨年には一般向けの解説書「ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の

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。

【畠山哲郎】

毎日新聞 2016/2/13



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

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

中谷宇吉郎余話／杉山滋郎

音楽談話室（四）－ショパンの青年時代／井元信之

自然哲学復権の秋（とき）の到来／佐々木力

随筆遺産発掘（四）－綿菓子／平田森三（解説：細川光洋）

紙魚の塵（四）－映画と政治と数学と／胡瓜庵散人

窮理の種（三）－水晶と心太／永橋禎子

「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・ライツィによる「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

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。最近が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の側面が強かった。しかし、十九世紀になると、科学研究は「科学者」という職業的専門家によって各種高等教育機関で営まれる知識生産へと変容し始める。既存の知識の改訂と拡大のみを生業とする集団を社会に組み込むことになったのである。さらに二十世紀になり、国民国家の競争の時代になると、科学は技術的な威力と結びつくことによって、この競争の重要な戦力としての力を発揮し始める。二度にわたる世界大戦が科学―技術の社会における位置づけを決定的にしていたのである。

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

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

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

4 しかし、科学者は依然として「もつと科学を」という発想になじんでおり、このような「科学が問題ではないか」という問いかけを、科学に対する無知や誤解から生まれた情緒的反発とみなしがちである。ここからは、素人の一般市民への科学教育の充実に、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、チエルノブイリ事故や狂牛病に象徴されるような事件によって科学への幻滅が生じ、一転して全面的に悪なる存在というイメージに変わったというのである。

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

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

のどちらかのイメージに引き裂かれているという。そして、このような分裂したイメージを生んだ理由は、科学が実在と直結した無謬の知識という神のイメージで捉えられてきており、科学が自らを実態以上に美化することによって過大な約束をし、それが必ずしも実現しないことが幻滅を生み出したからだという。つまり、全面的に善なる存在というイメージが科学者から振りまかれ、他方、チエルノブイリ事故や狂牛病に象徴されるような事件によって科学への幻滅が生じ、一転して全面的に悪なる存在というイメージに変わったというのである。

6 コリンズとピンチの処方箋は、科学者が振りまいた当初の「実在と直結した無謬の知識という神のイメージ」を科学の実態に即した「不確実で失敗しがちな向こう見ずでへまをする巨人のイメージ」、つまりCゴレムのイメージに取りかえることを主張したのである。そして、科学史から七つの具体的な実験をめぐる論争を取り上げ、近年の科学社会学研究に基づくケーススタディーを提示し、科学上の論争の終結がおよそ科学哲学者が想定するような論理的、方法的決着ではなく、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。一九六九年にウェーバーが、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、重力波の存在をめくって論争となったのである。この論争において、実験はどのような役割を果たしていたかという点が興味深い。追試実験から、ウェ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、ウェ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、本当はウェ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いければ、装置が優れたものであったかどうかはわからない。しかし、優れた装置がなければ、何が適切な結果かということはわからない……」。コリンズとピンチはこのような循環を「実験家の悪循環」と呼んでいる。

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

10 コリンズとピンチは、このようなケーススタディーをもとに、「もっと科学を」路線を批判するのである。民主主義国家の一

7 ウェーバー——ジョセフ・ウェーバー(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——ウェ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 | (エ) | センコク |
| 3 | | 4 | |
| ⑤ | ヤツコウがある野草を探す | ⑤ | 筆跡がコクジした署名 |
| ④ | ヤツキになって反対する | ④ | コクソウ地帯 |
| ③ | ヤクドシを乗り切る | ③ | コクビヤクのつけにくい議論 |
| ② | ツウヤクの資格を取得する | ② | コクメイな描写 |
| ① | ゴリヤクがある | ① | 上級裁判所へのジョウコク |

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne



"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

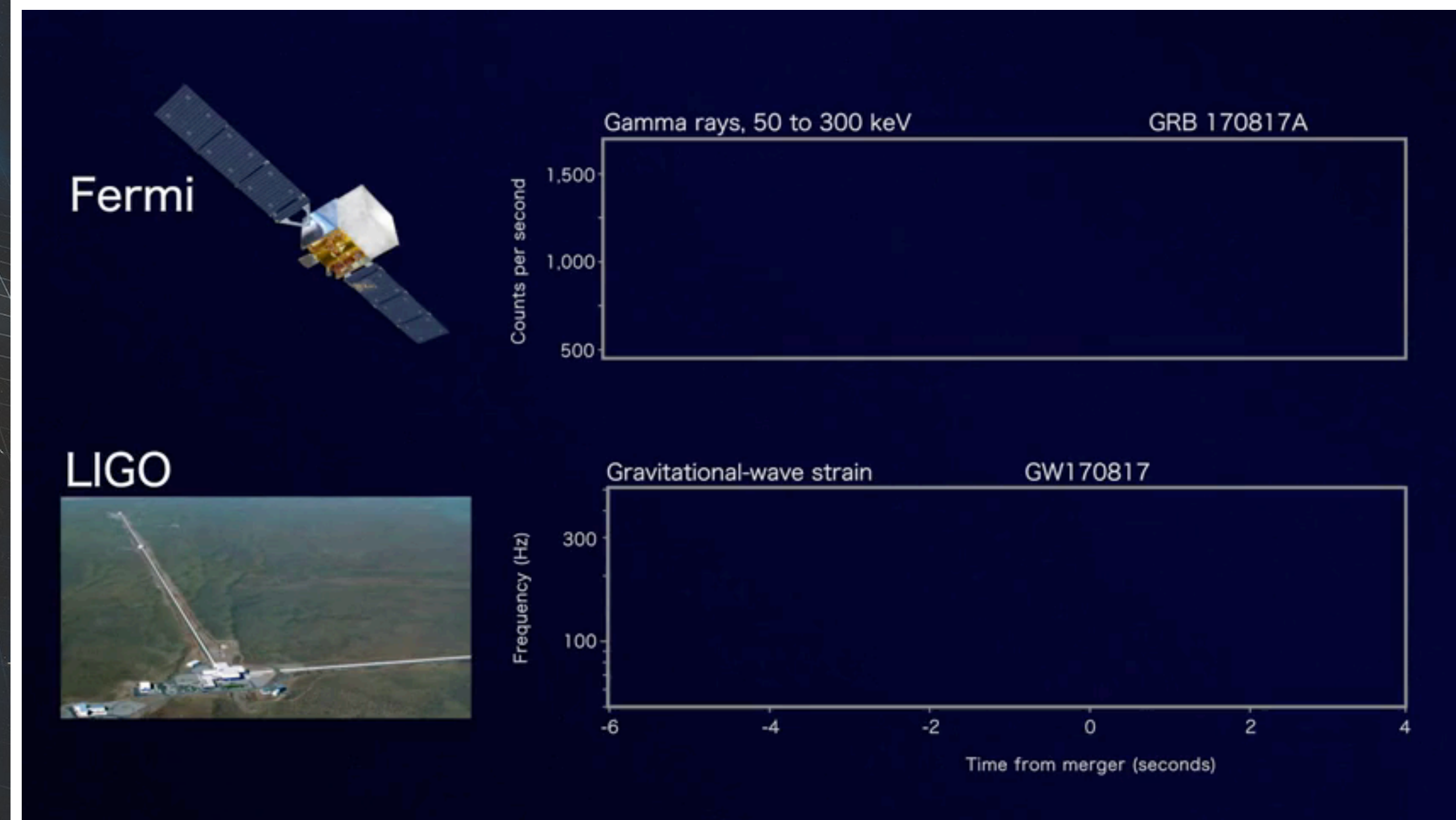
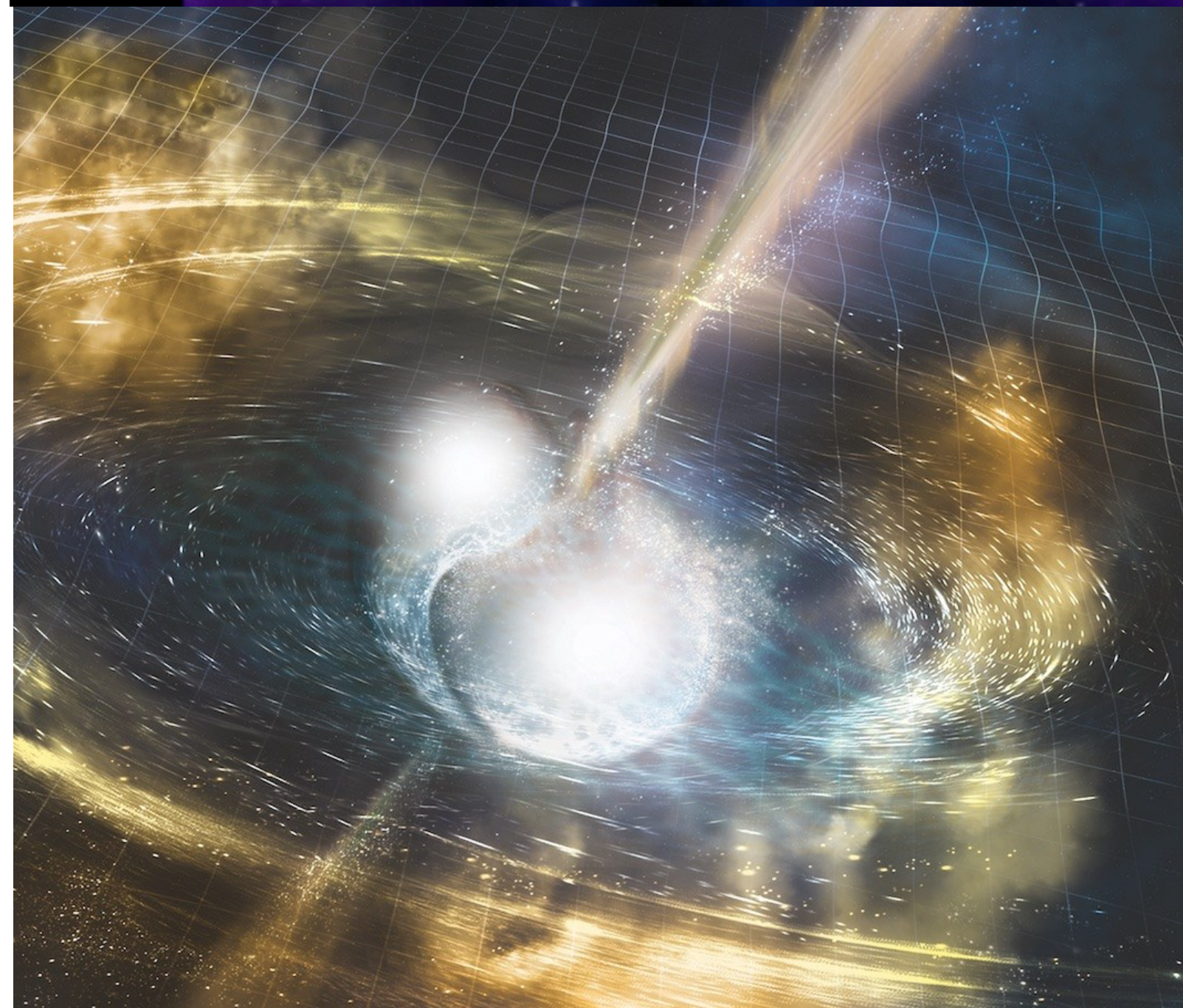
LIGO検出器への決定的な貢献と重力波の観測に対して

ライナー・ワイス(85)

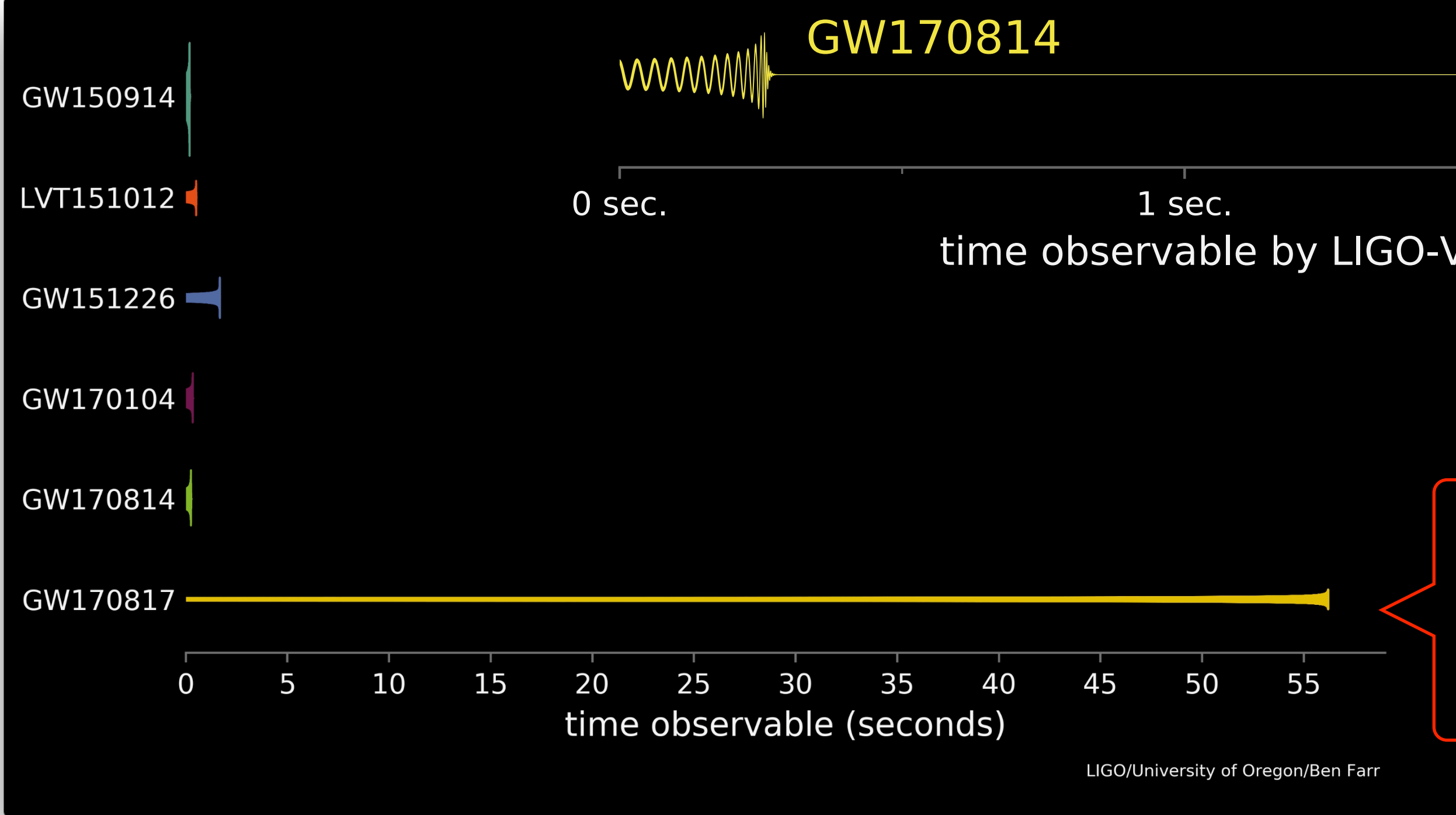
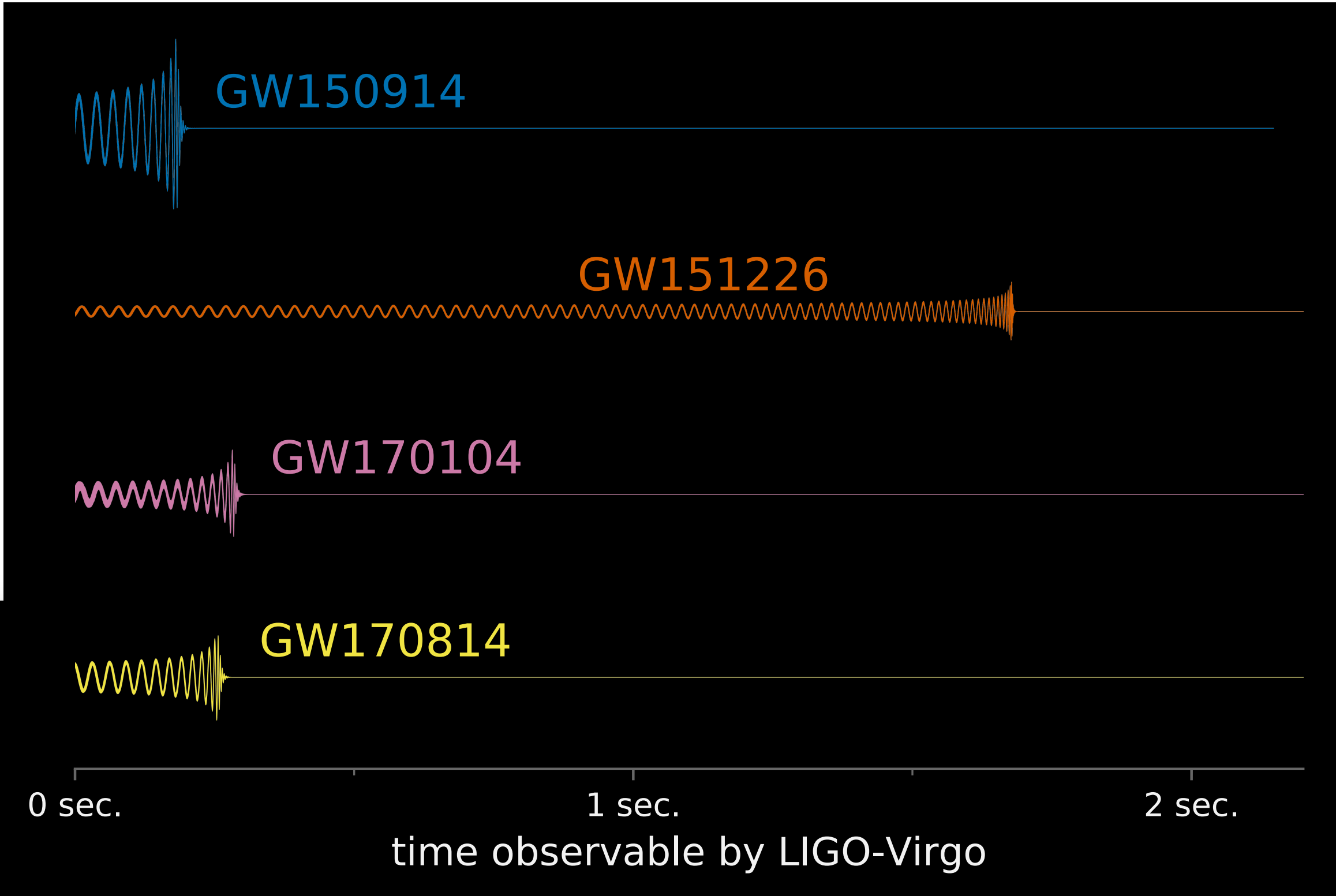
バリー・バリッシュ(77)

キップ・ソーン(77)

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

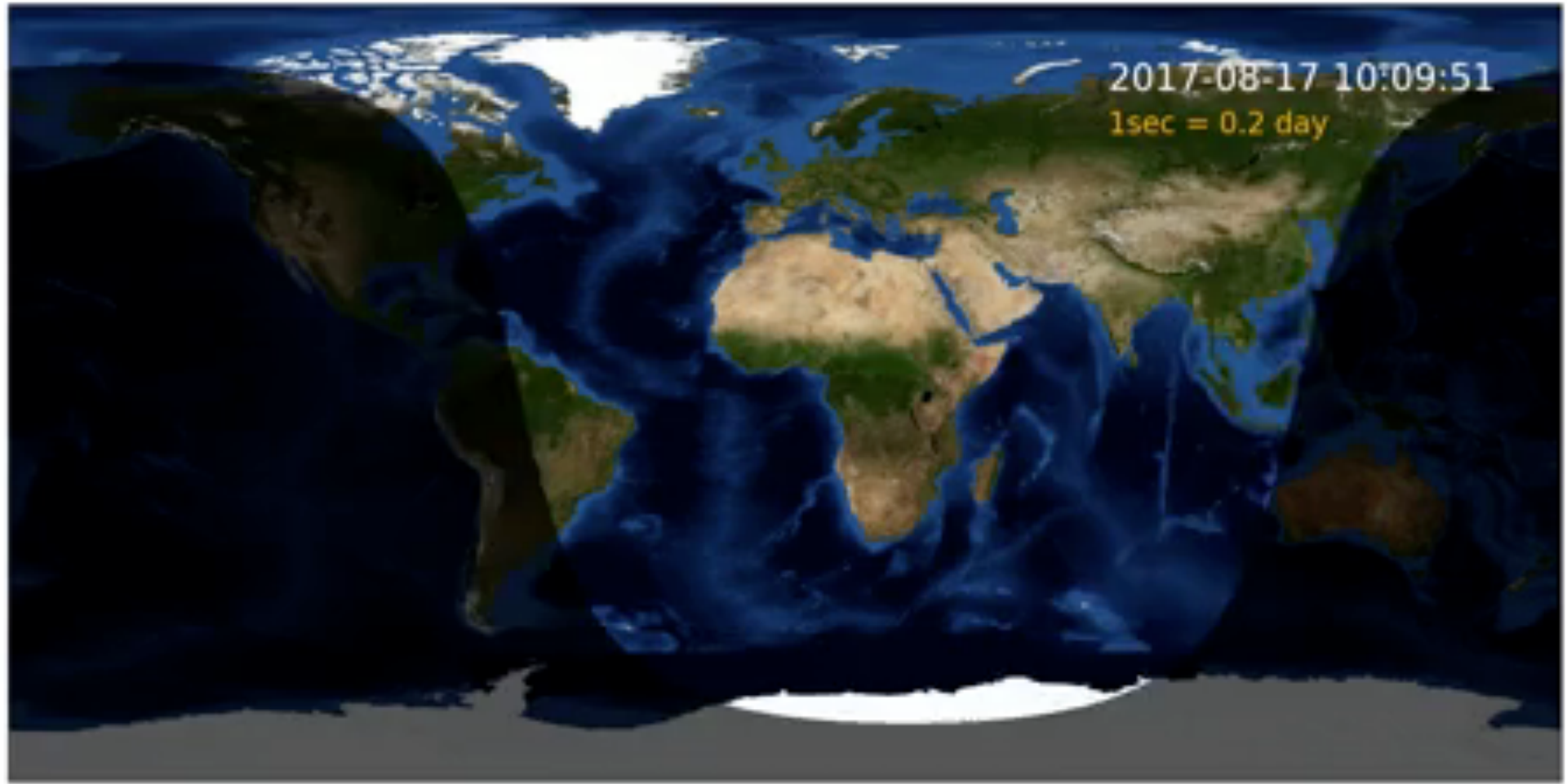
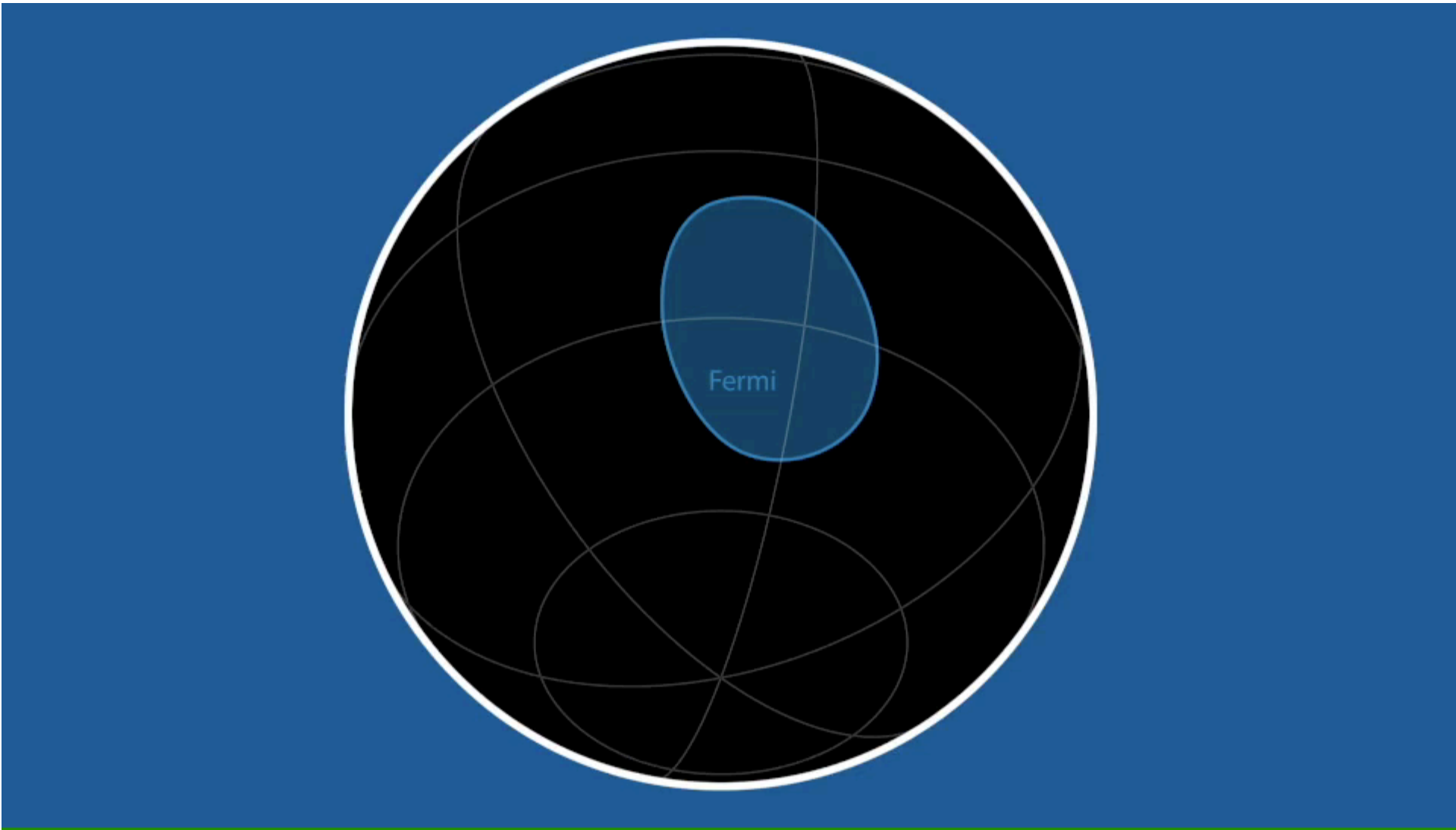


これまでの
BHBH合体
による重力波



今回のNSNS
合体による重力波

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測



波源はNGC4993 (40Mpc先) !

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

Abbott et al.

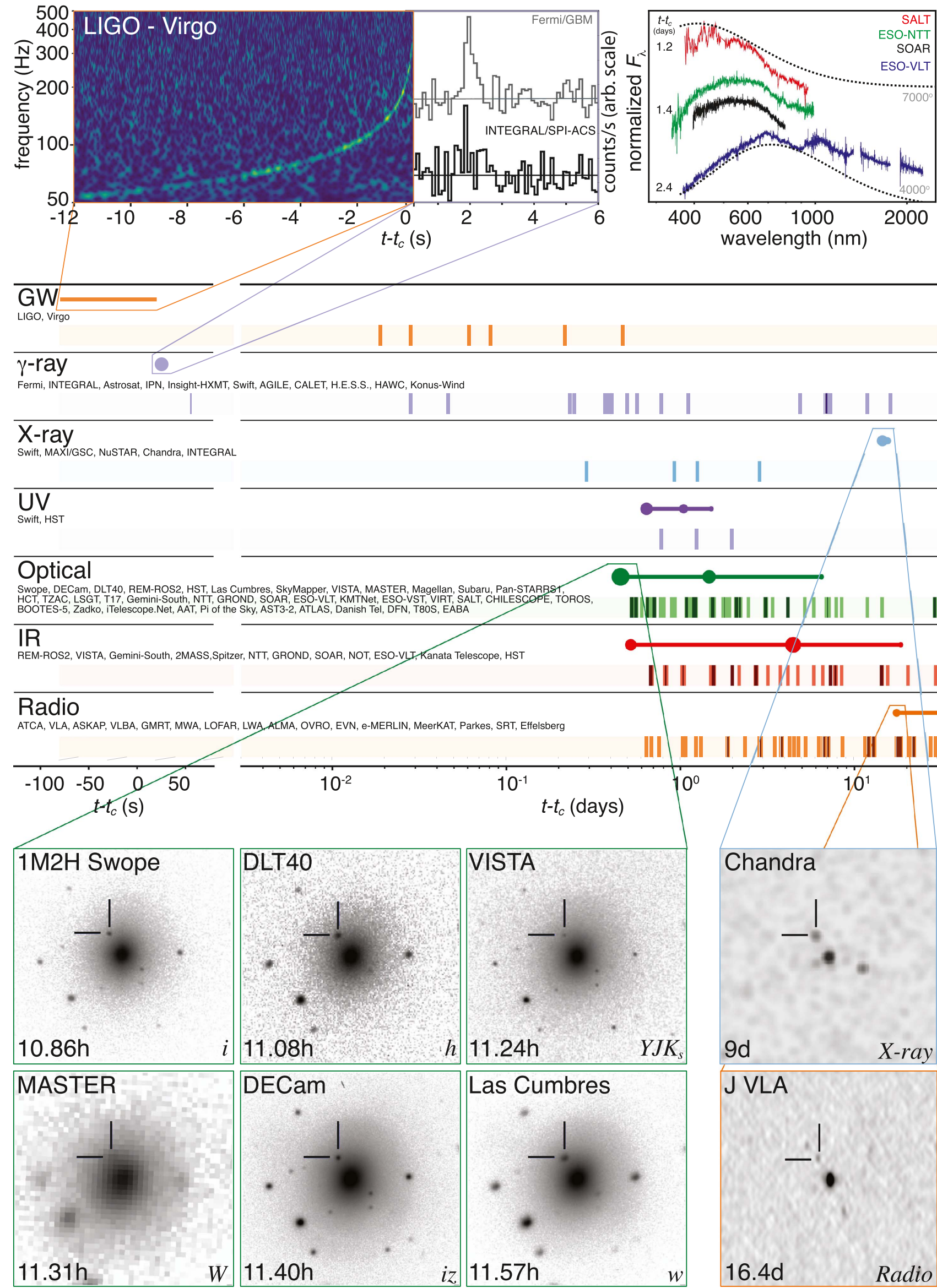
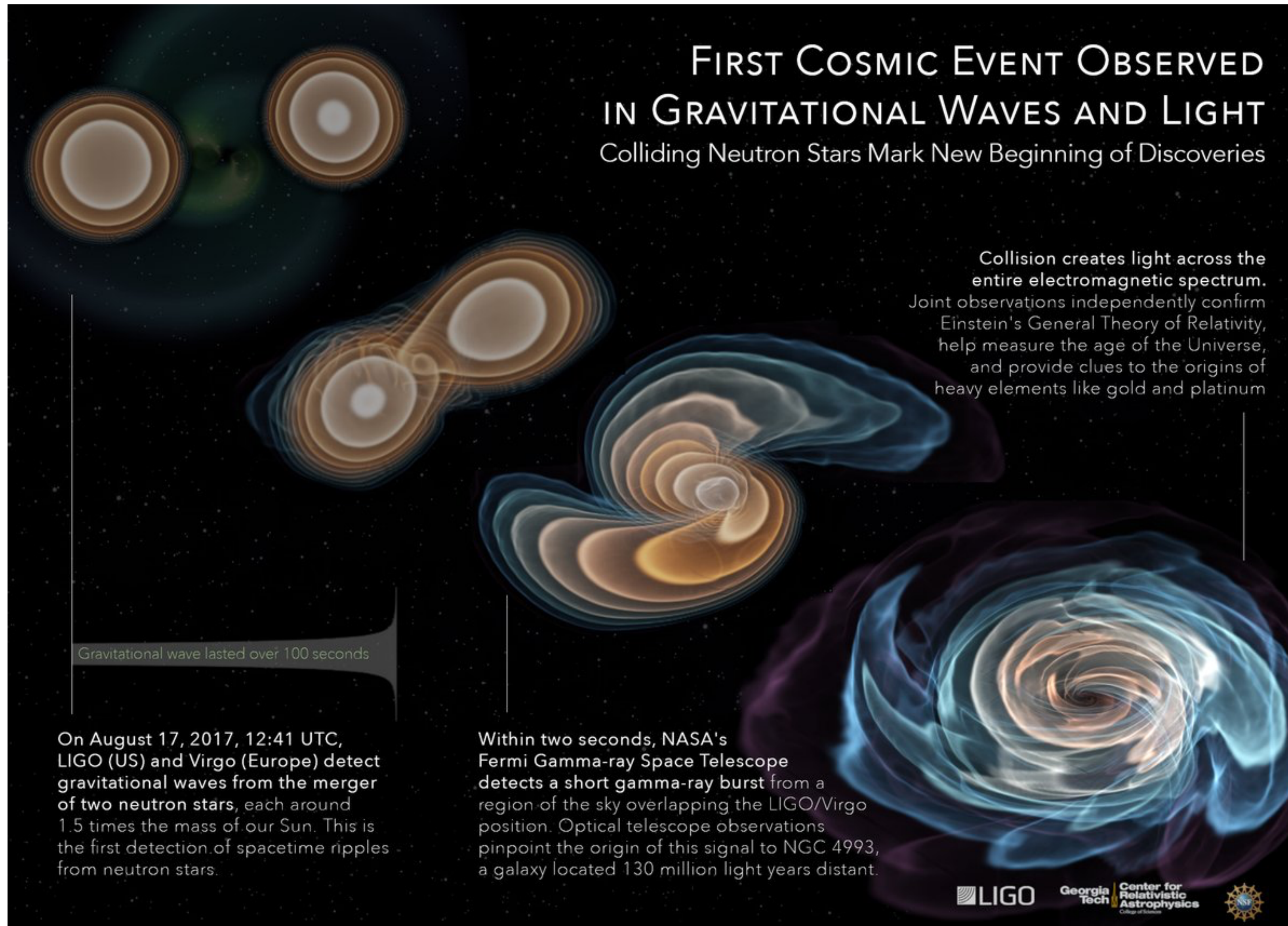


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent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

周期表 (periodic table)

[illegible]

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (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

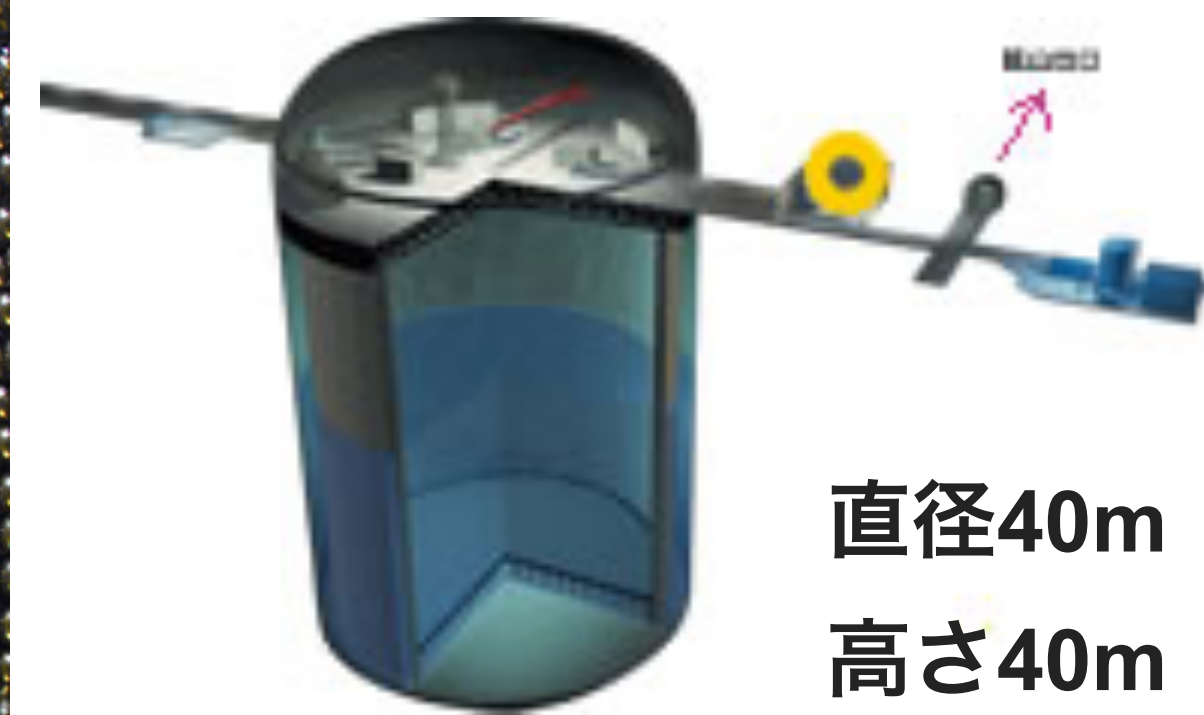
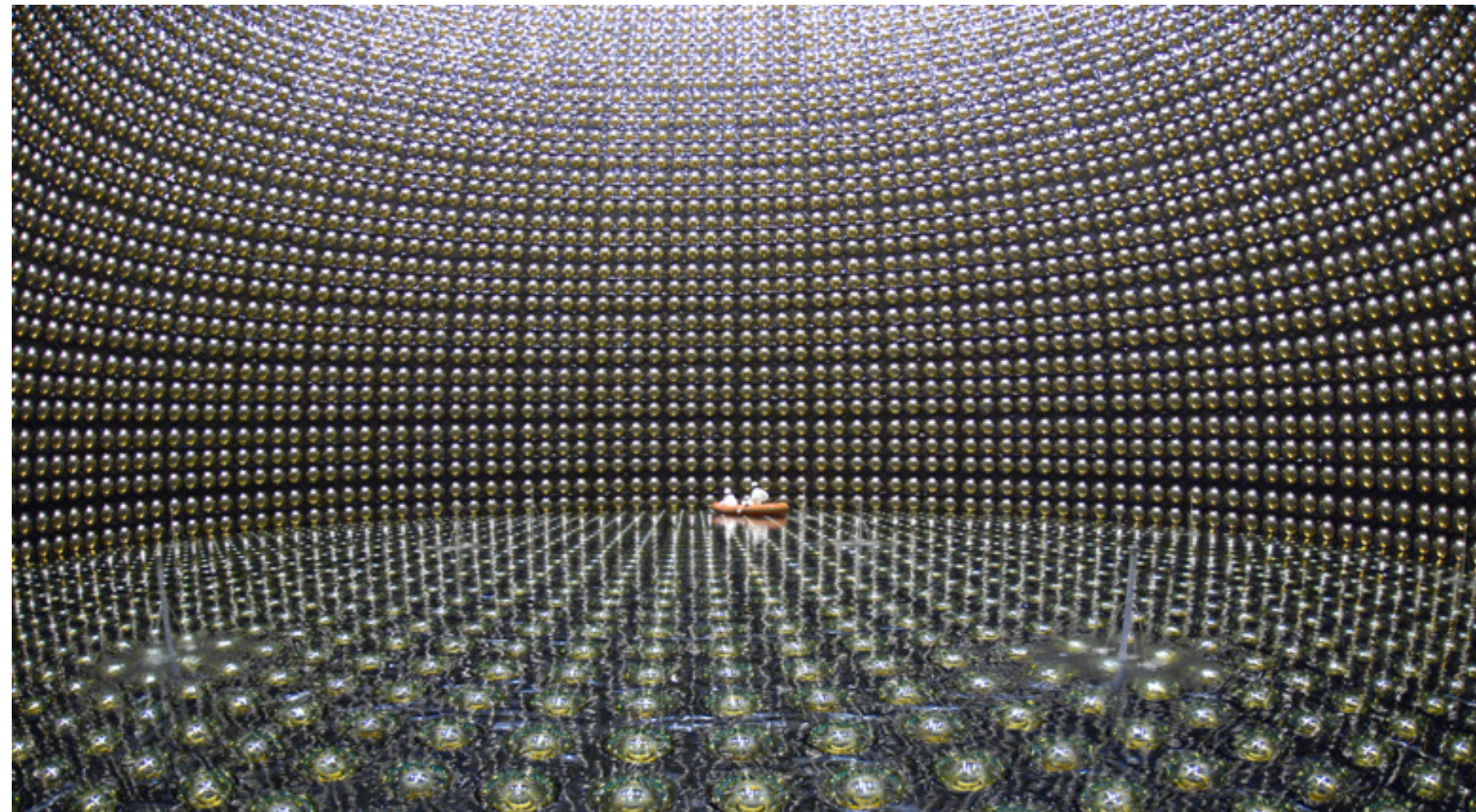
鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却
熱雑音を小さくするため

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

スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

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



直径40m

高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり、
宇宙から飛来するニュートリノを観測する。



ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊 (2002年)

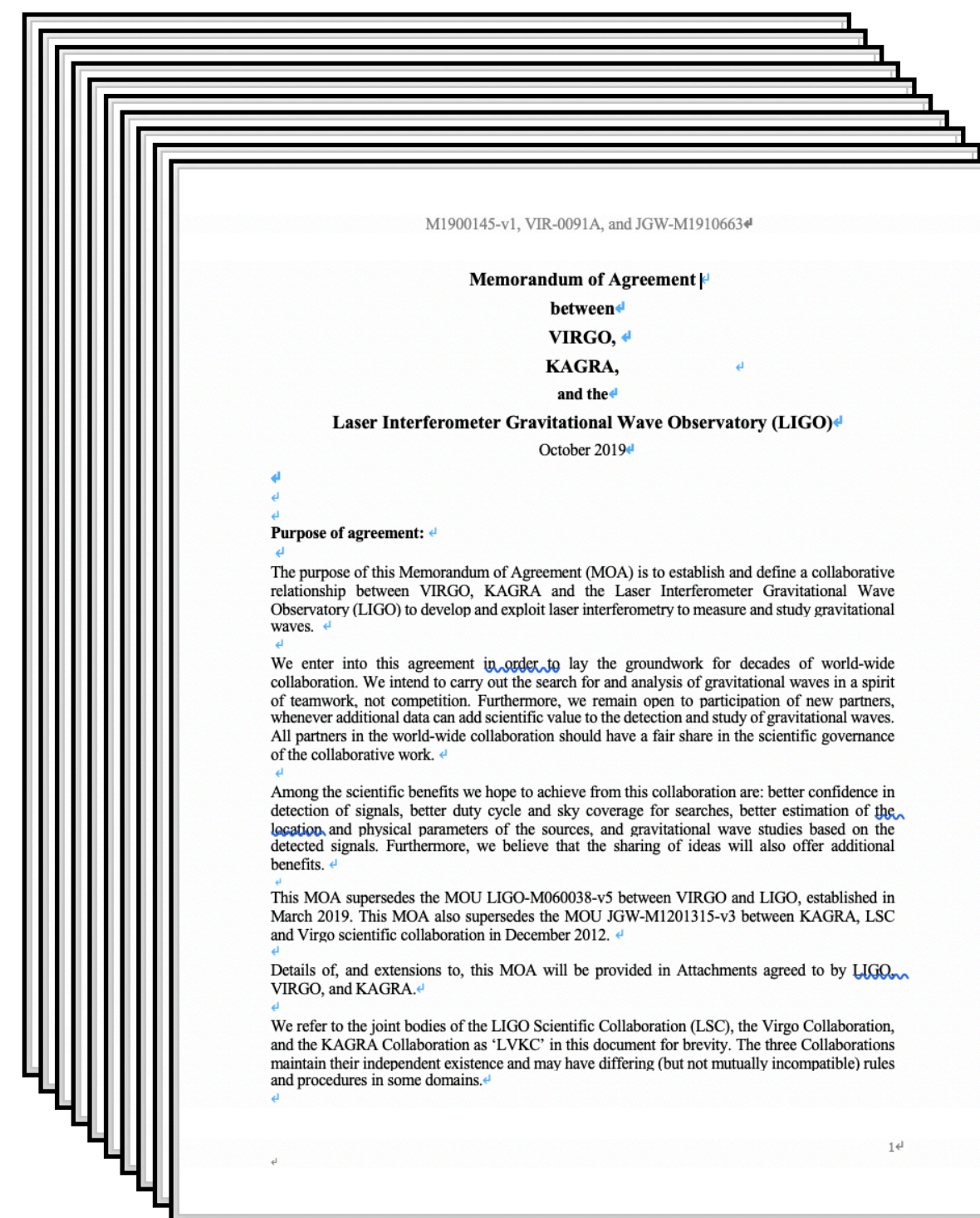
梶田隆章 (2015年)



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

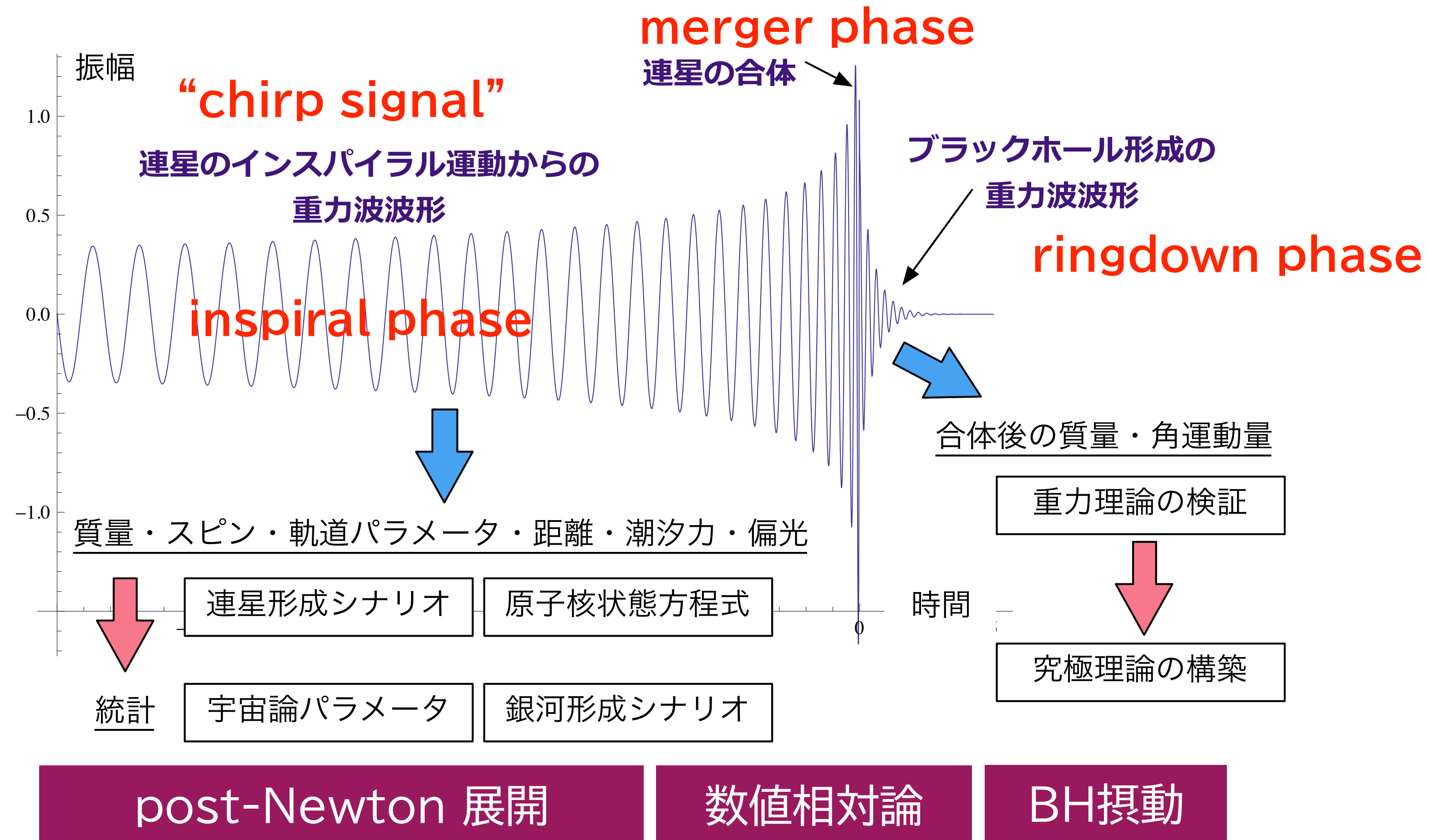


KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

重力波で何がわかる？



- ★ ノイズにまみれた観測データに、予想される波形を掛け合わせて、重力波の検出を行う(matched-filtering法)
- ★ 数値シミュレーションを用いたテンプレートづくり+パラメータで補間した波形モデル
- ★ 連星BHのパラメータ

$$(m_1, m_2, s_1, s_2, \iota, \mathbf{n}, t_c, \varphi_c, \psi, r)$$

質量, スピン, 軌道傾斜角, 合体時刻, 位相, 偏角, 距離

重力波で何がわかる？

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

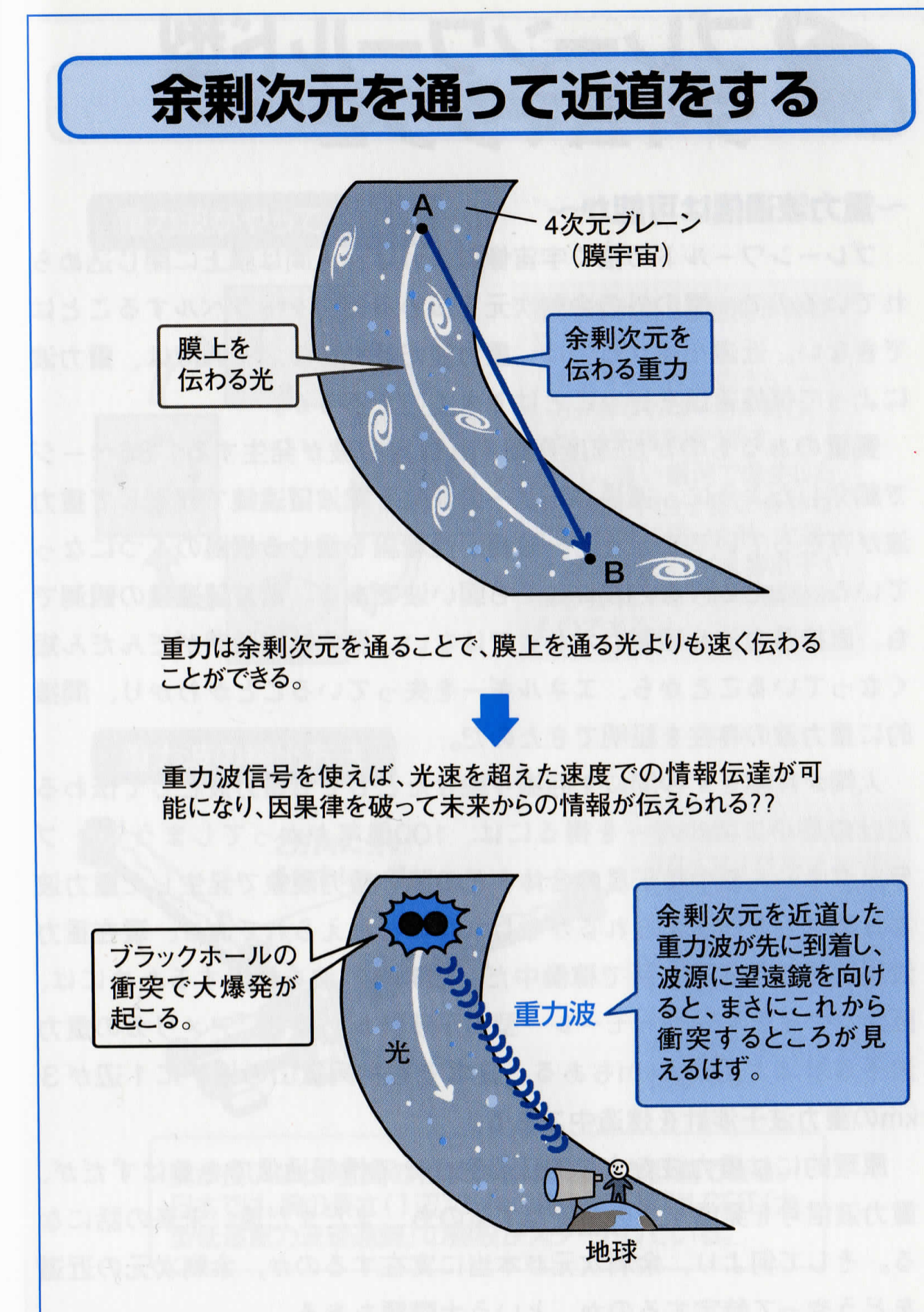
～膜宇宙に生じる近道～

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^{†24}。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^{†25}。



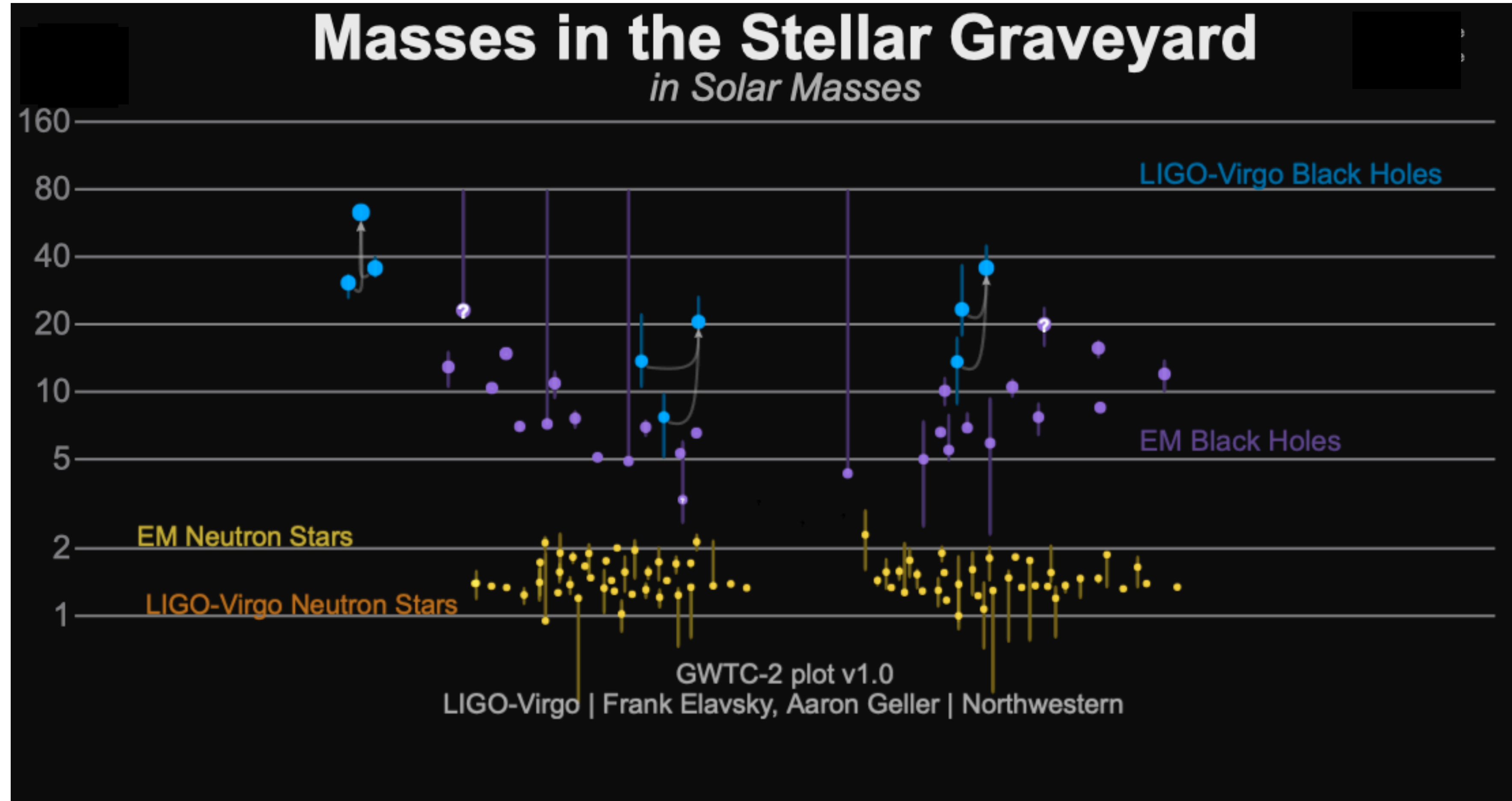
2021年11月 重力波カタログ3 発表



Zoheyr Doctor / CIERA / LIGO-Virgo Collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/index.php>

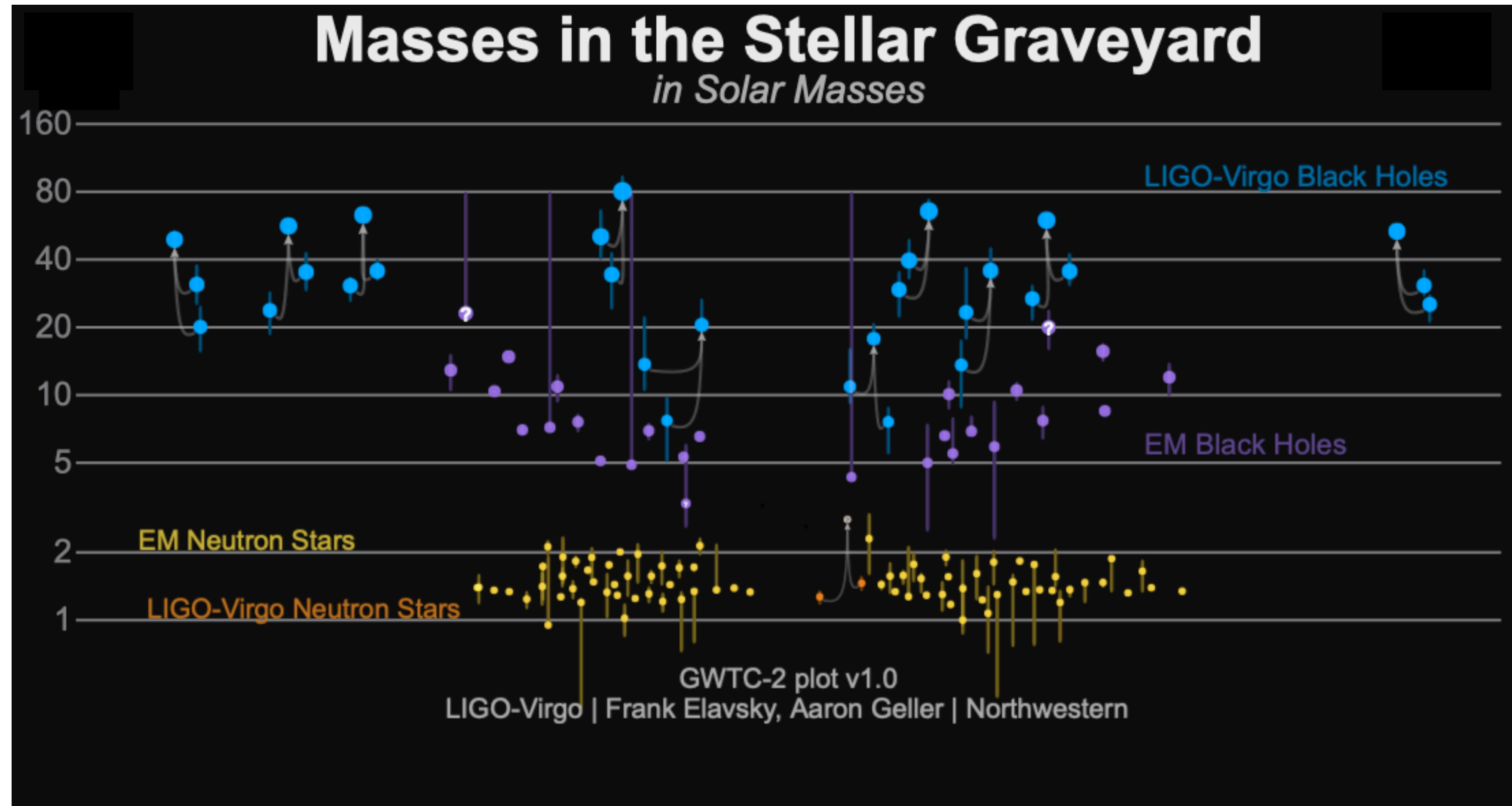
O1 (2015/9/12 - 2016/1/19)



3 BHBH

GW150914: the first ever detection of gravitational waves from the merger of two black holes more than a billion light years away

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

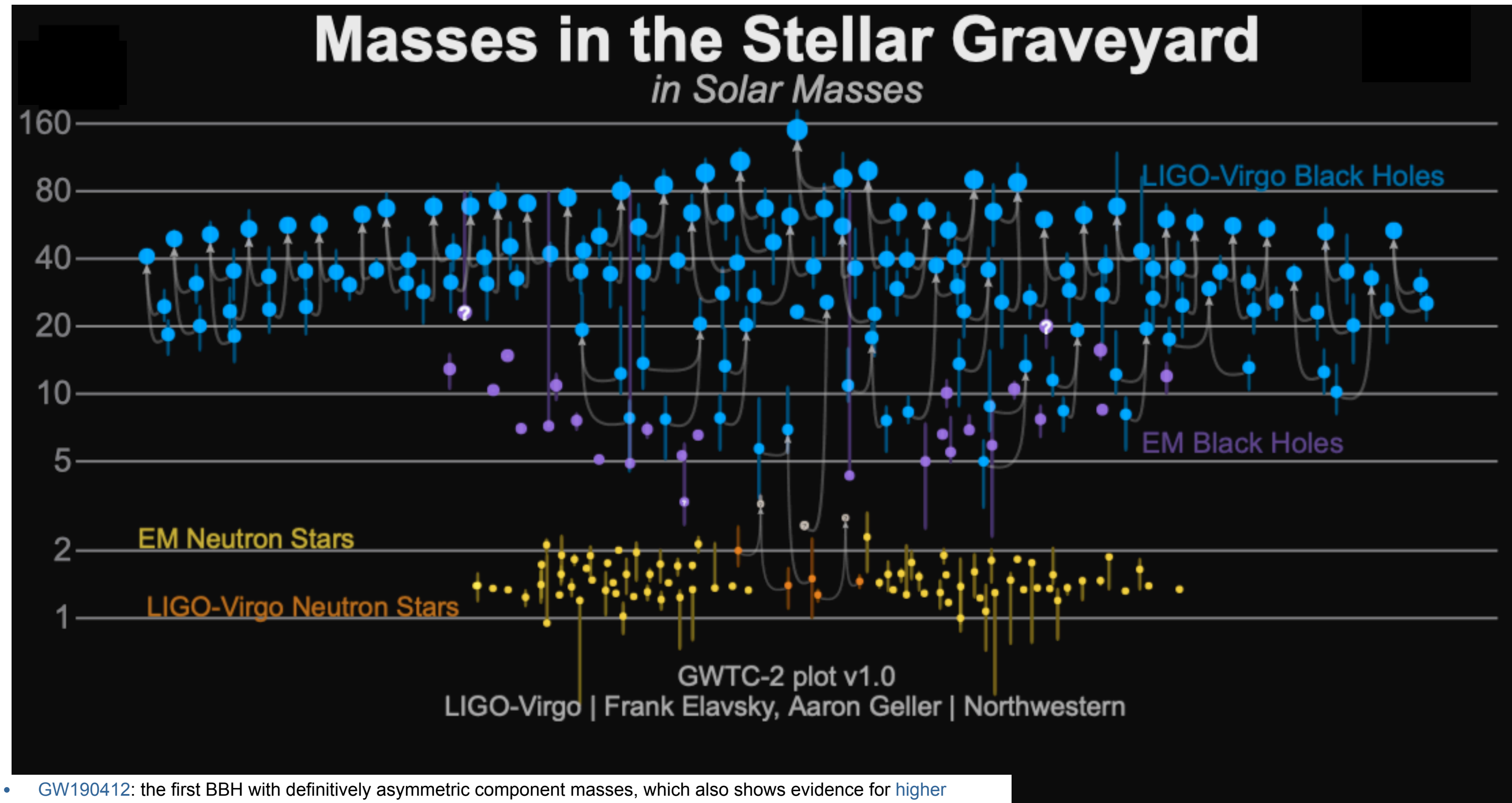


- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic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

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

10 BHBH

1 NSNS

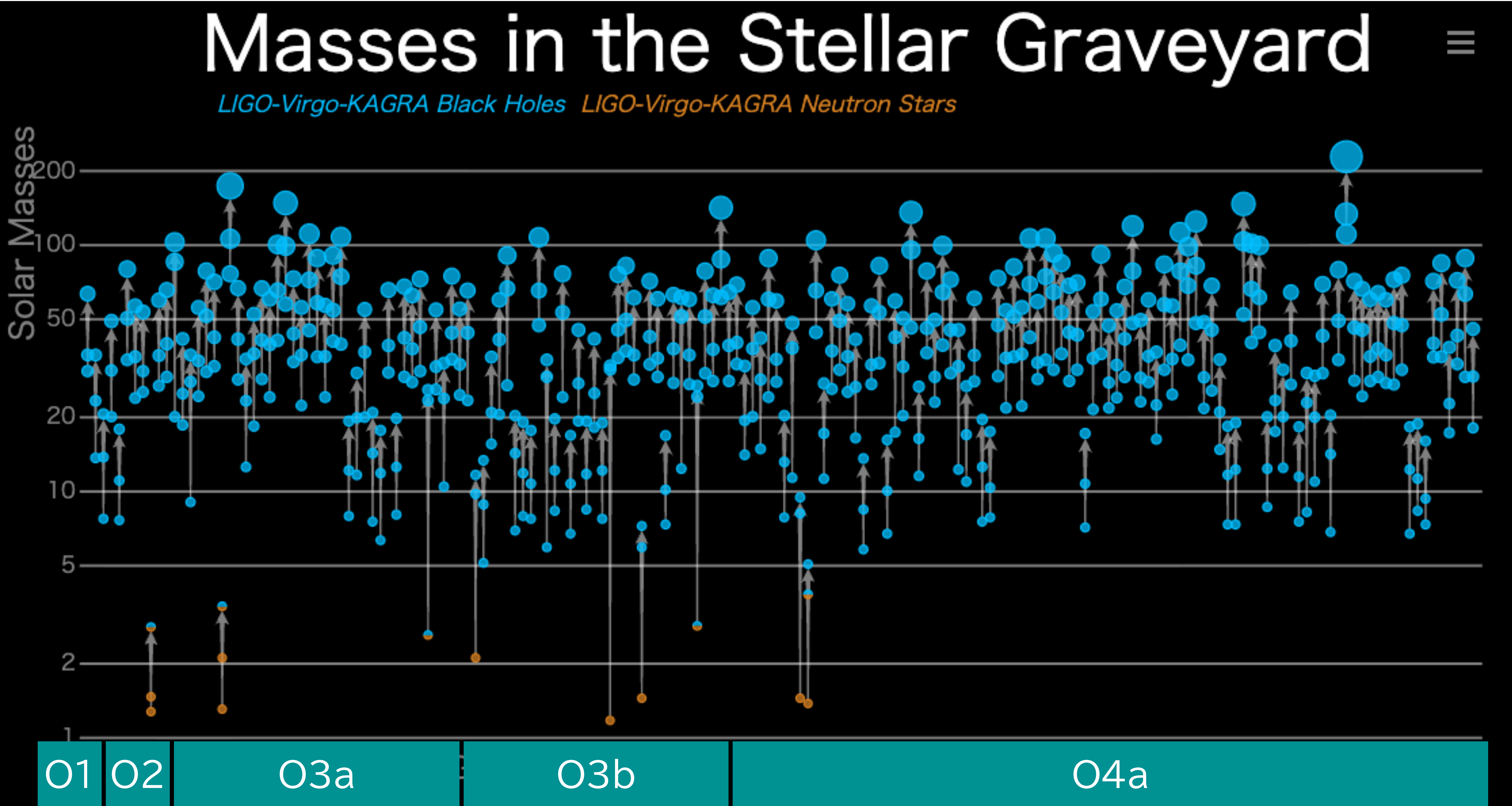


- [GW190412](#): the first BBH with definitively asymmetric component masses, which also shows evidence for [higher harmonics](#)
- [GW190425](#): the second gravitational-wave event consistent with a BNS, following [GW170817](#)
- GW190426_152155: a low-mass event consistent with either an NSBH or BBH
- GW190514_065416: a BBH with the smallest effective aligned spin of all O3a events
- GW190517_055101: a BBH with the largest effective aligned spin of all O3a events
- [GW190521](#): a BBH with total mass over 150 times the mass of the Sun
- [GW190814](#): a highly asymmetric system of ambiguous nature, corresponding to the merger of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object, making the latter either the lightest black hole or heaviest neutron star observed in a compact binary
- GW190924_021846: likely the lowest-mass BBH, with both black holes exceeding 3 solar masses

46 BHBH

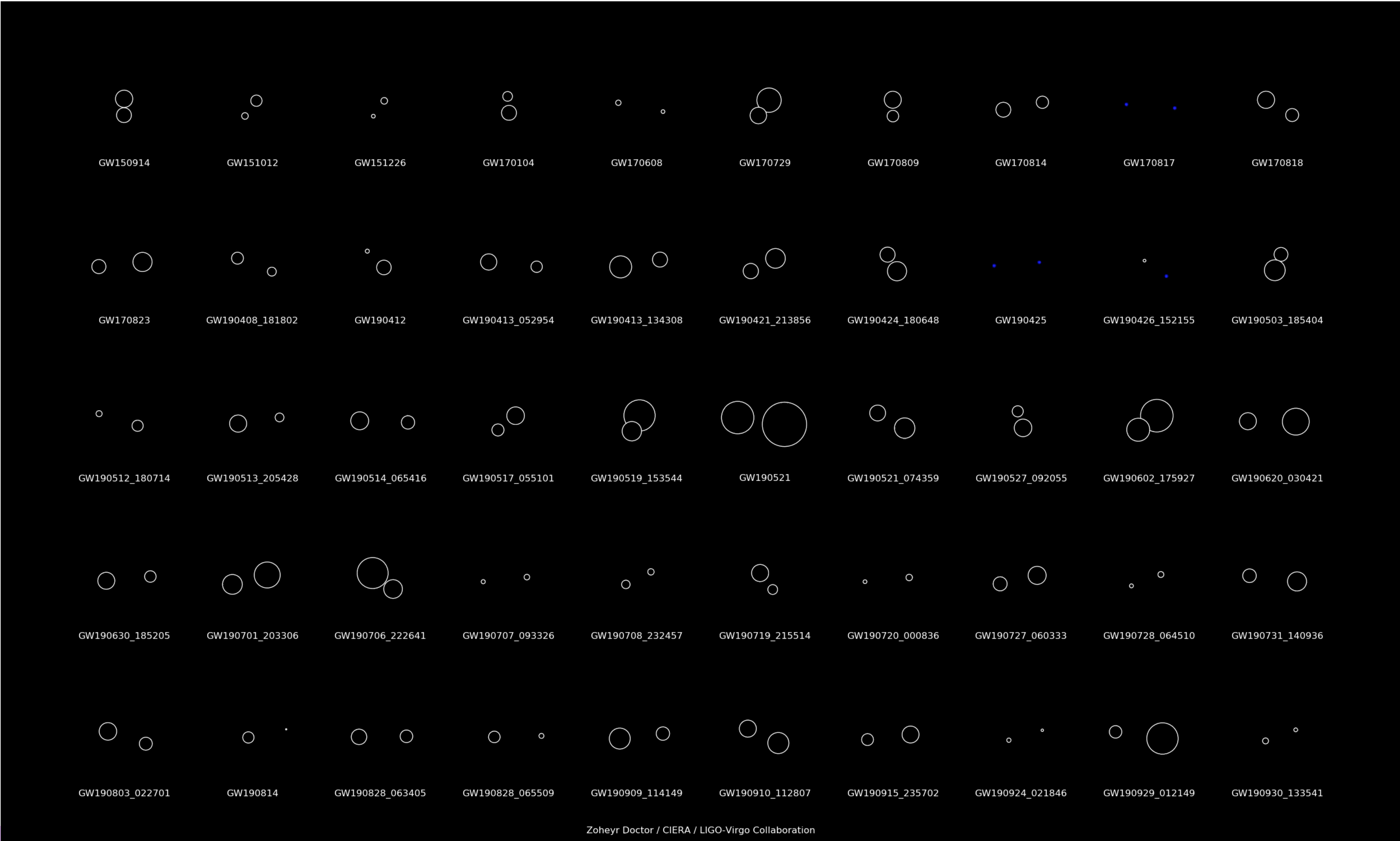
2 NSNS

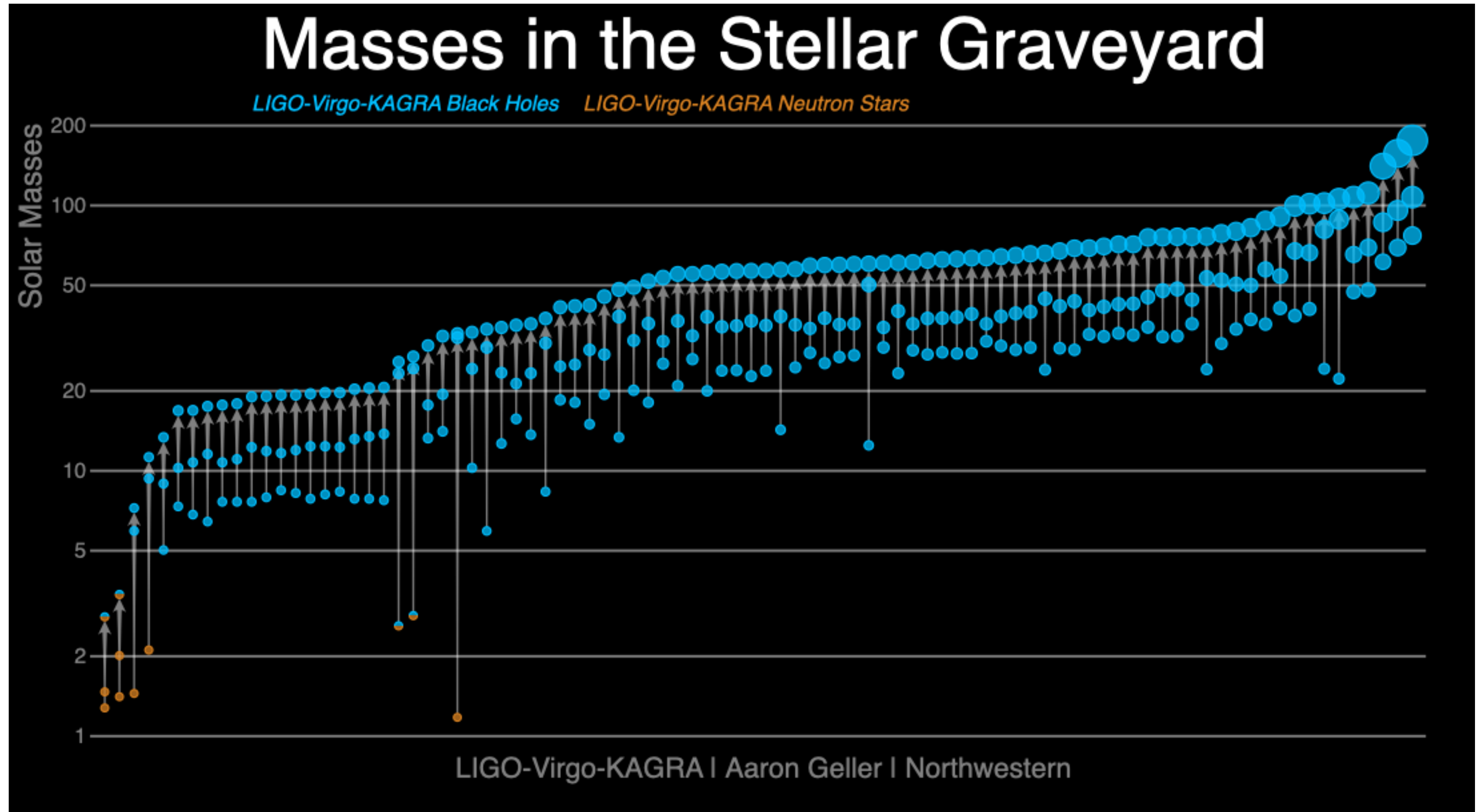
2 BH+?

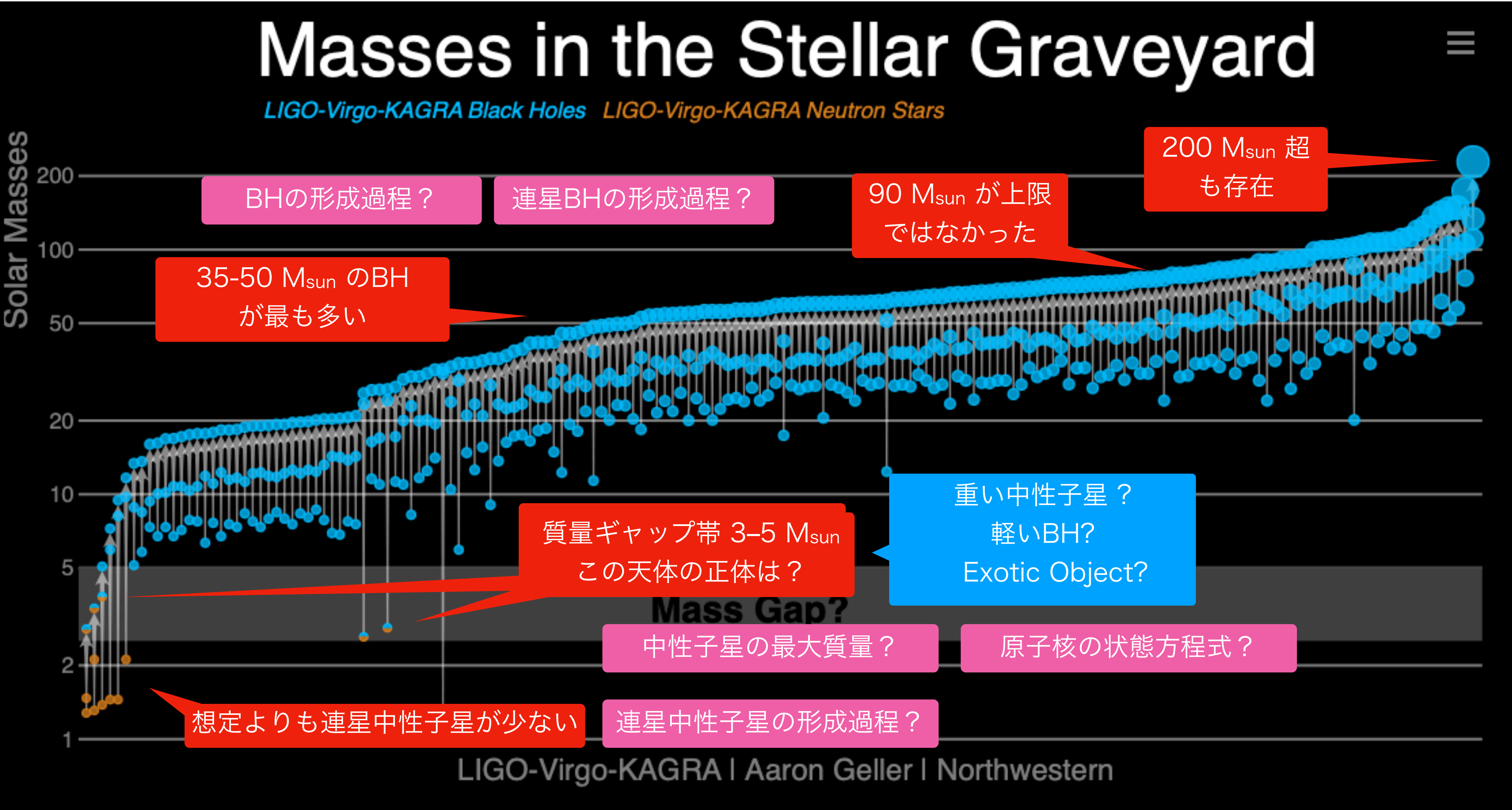


O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

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







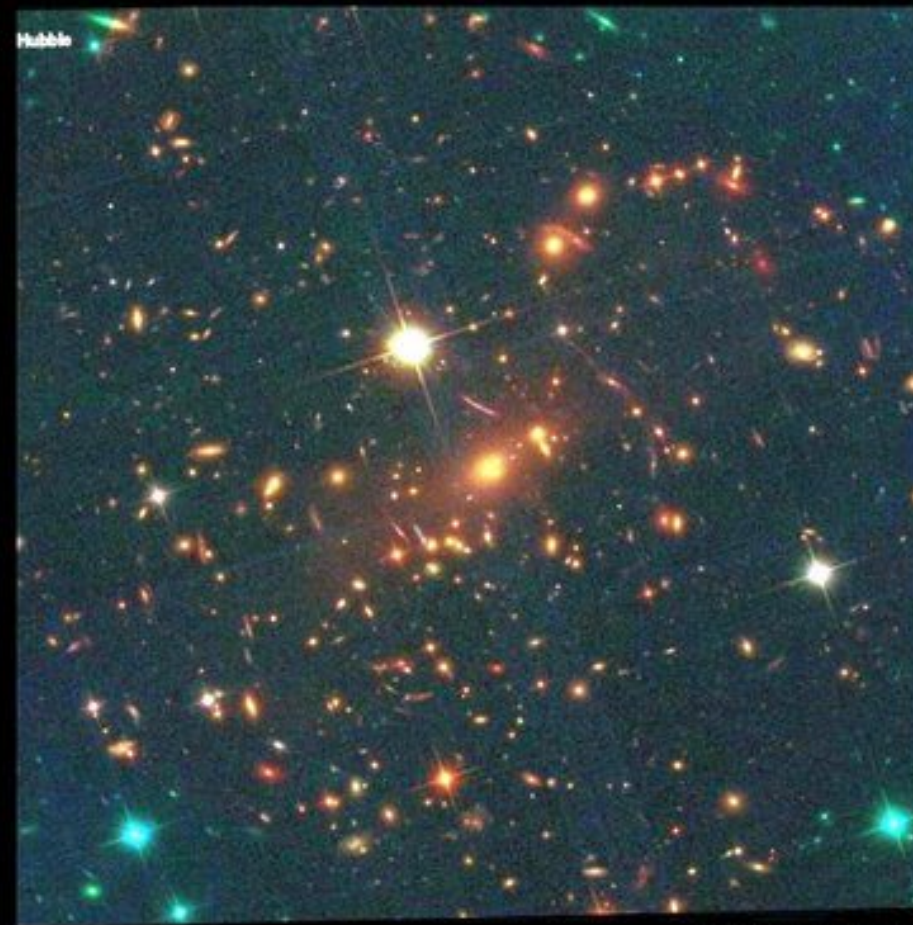
重力波の初観測から10年, 非常に明確なGW250114を報告

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

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

A New Perspective on the Universe

Hubble Space Telescope (2017)



NASA, ESA, CSA, and STScI

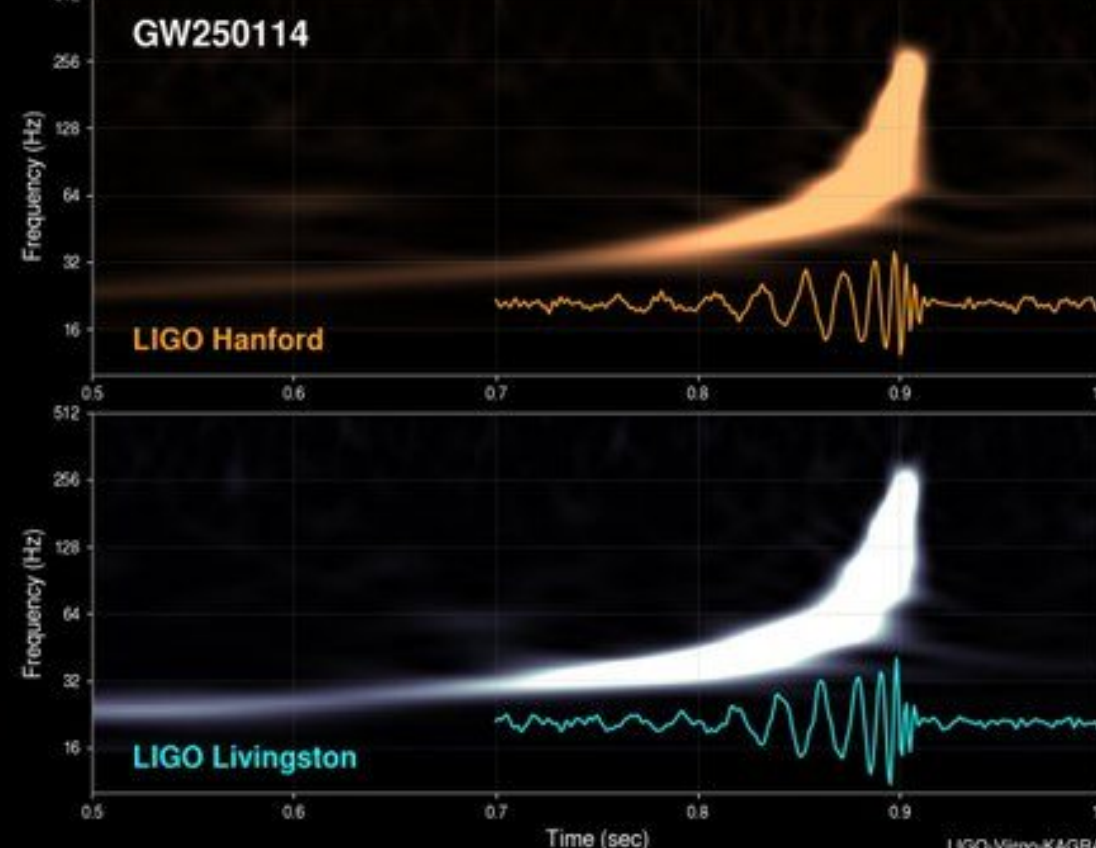
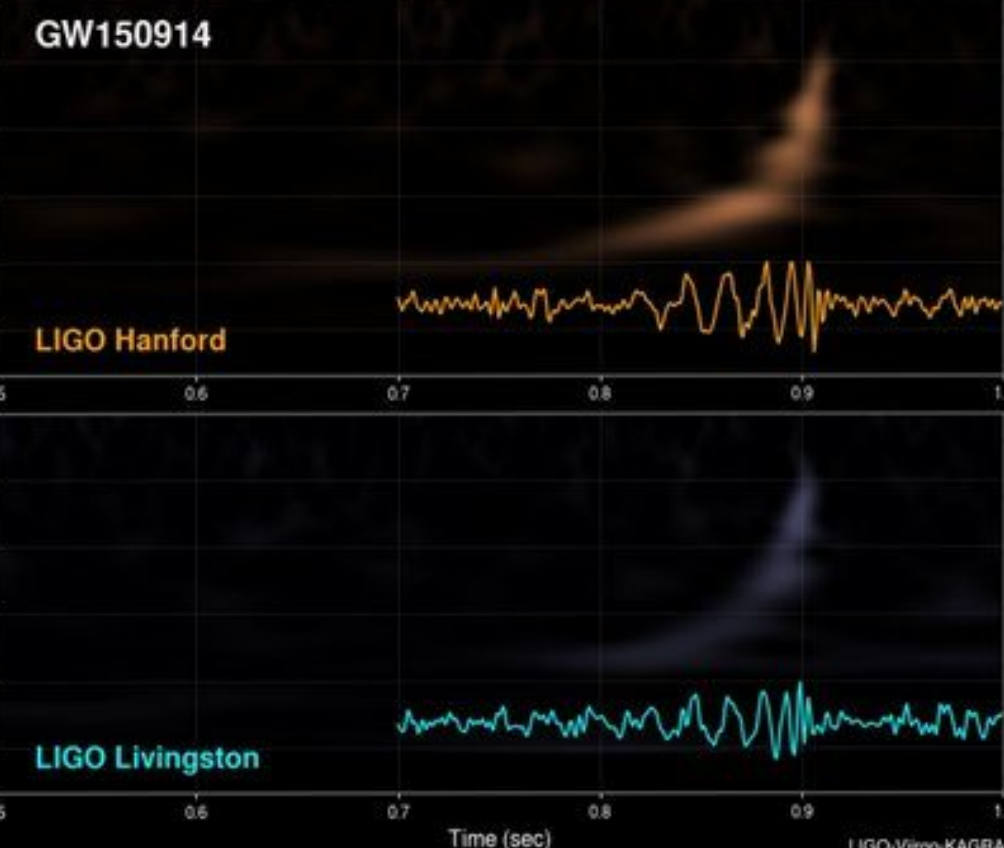
James Webb Space Telescope (2022)



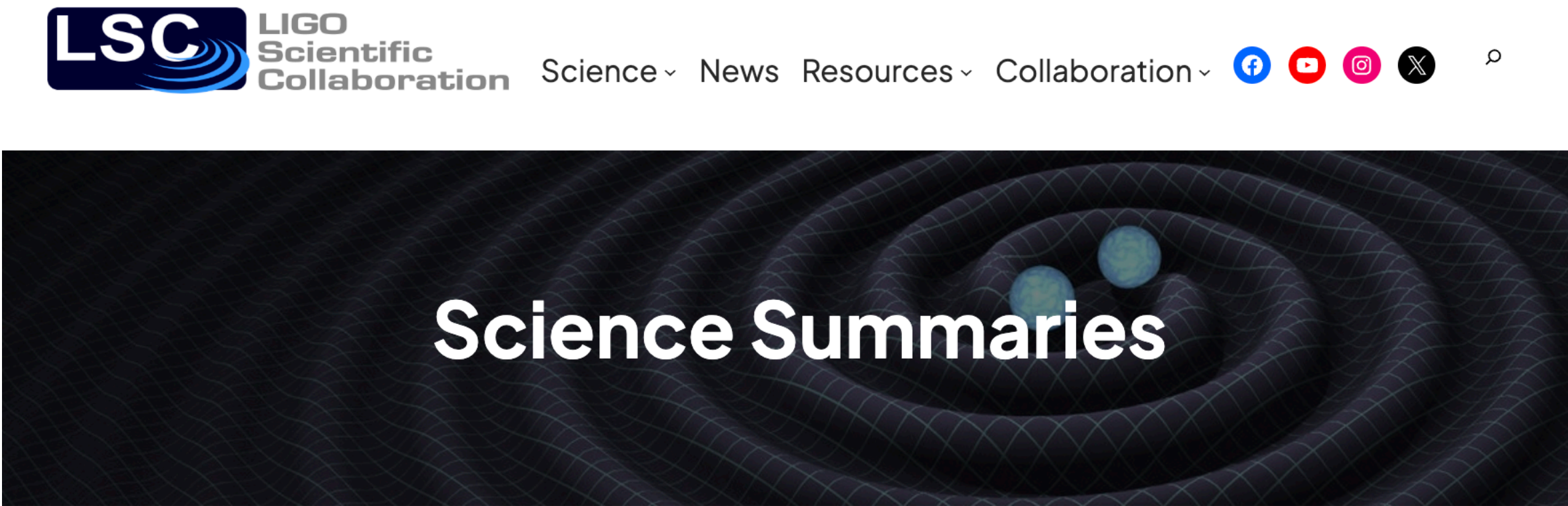
NASA, ESA, CSA, and STScI

LIGO - First Observing Run (2015)

LIGO - Fourth Observing Run (2025)



<https://ligo.org/science-summaries/>



For each of our new research articles, we feature a summary of the paper's key points written for the general public. Simply click on any of the '[PDF]' links for a downloadable file in PDF format. Translations into several languages are also available for some of these summaries. Most recent papers, and their summaries, are written together by the LIGO Scientific Collaboration (LSC), the Virgo Collaboration and the KAGRA Collaboration, forming the LVK collaboration.

Translations are a volunteer effort and different sets of languages are available for each summary. For most summaries, we list any available translations by their ISO 639-1 / ISO 639-2 keys, as listed [here](#). **YOU CAN FIND TRANSLATIONS BY CLICKING ON THE BLACK TRIANGLE NEXT TO EACH SCIENCE SUMMARY ENTRY.**

Jump to: [2025](#) | [2024](#) | [2023](#) | [2022](#) | [2021](#) | [2020](#) | [2019](#) | [2018](#) | [2017](#) | [2016](#) | [2015](#) | [2014](#) | [2013](#) | [2012](#) | [2011](#)

Translations

You can search for the key of your language, in square brackets – for instance [fr] for French – on this page to find all science summaries that have been translated into it.

- **[bla]**: Blackfoot
- **[bn]**: Bengali (Bangla / বাংলা)
- **[ca]**: Catalan (Català)
- **[de]**: German (Deutsch)
- **[el]**: Greek (Ellinika / Ελληνικά)
- **[es]**: Spanish (Español / Castellano)

2025

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

黒い三角形をクリックすると、各言語版での解説リンクが現れます。

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 ($2\rho_{\text{nuc}} = 3.5^{+2.7}_{-1.7} \times 10^{34} \text{ dyn/cm}^2$) (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 $2\text{--}5M_{\odot}$ 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 $M_c = (M_1M_2)^{3/5}/(M_1+M_2)^{1/5}$, 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_{final} ($M_{\odot}$)	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	28.6 ^{+1.7} _{−1.5}	0.86	−0.01 ^{+0.12} _{−0.13}	63.1 ^{+3.4} _{−3.0}	440 ⁺¹⁵⁰ _{−170}	182	26
GW170814	24.1 ^{+1.4} _{−1.1}	0.82	0.07 ^{+0.12} _{−0.12}	53.2 ^{+1.5} _{−2.4}	600 ⁺¹⁵⁰ _{−220}	92	17.7
GW190412	13.3 ^{+0.5} _{−0.5}	0.32	0.21 ^{+0.12} _{−0.13}	35.6 ^{+2.4} _{−4.5}	720 ⁺⁴⁸ _{−220}	240	19.8
GW190521	63.3 ^{+19.6} _{−14.6}	0.58	−0.14 ^{+0.5} _{−0.45}	147.4 ^{+40.0} _{−16.0}	3310 ⁺²⁷⁹⁰ _{−1800}	1000	14.3
GW190521_074359	32.8 ^{+3.2} _{−2.8}	0.77	0.1 ^{+0.13} _{−0.13}	72.6 ^{+6.5} _{−5.4}	1080 ⁺⁵⁸⁰ _{−530}	470	25.9
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 ^{+9.6} _{−7.5}	0.72	−0.29 ^{+0.32} _{−0.61}	107 ^{+18.0} _{−15.0}	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 $17.9\text{--}44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$, BNSは $10\text{--}1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$, NSBHは $7.8\text{--}140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 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 まわり) の上限が得られている。また、既知のパルサーからの連続重力波に対しても個々に上限が得られている。

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

理科年表2025 (2024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2年間の予定で行われていた。~~ 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
O4a	2023 5 26 – 2024 1 16	—	2023 5 26 – 2023 6 25
O4b	2024 4 3 – 2025 6 9(予定)	同左	2024年12月 に再開

天 **80**(156) 天 文

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 $\rho_{\text{nuc}}=2.8\times10^{14}$ g/cm³ の2倍の密度における圧力として ($2\rho_{\text{nuc}}=3.5^{+2.7}_{-1.7}\times10^{34}$ dyn/cm² (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・赤外における追観測から鉄以上の重元素合成の形跡が見られ、r-過程元素合成の重要なチャンネルになっていることを示唆している。 GW190412 明らかに質量比の大きなBBHからの重力波で、重力波の高次モードの検出が試みられた。 GW190425 2番目に発見されたBNS。 GW190521 総質量が最大のBBHで、合体後の質量が150 $M_{\odot}$ 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2.5 $M_{\odot}$ の質量領域（質量ギャップ）のコンパクト天体からの重力波と考えられている。 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。 GW230529_181500 LIGO Livingston でのみ検出されたが、1.2-2.0 $M_{\odot}$ と2.5-4.5 $M_{\odot}$ の連星合体で、一方はNSの質量領域だが他方は質量ギャップ領域であることから、O4a期のイベントとして速報された。

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 $17.9\text{--}44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、BNSは $10\text{--}1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、NSBHは $7.8\text{--}140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 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） $\Omega_{\text{GW}}<6.0\times10^{-8}$ 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 まわり）の上限が得られている。また、既知のパルサーからの連続重力波に対しても個々に上限が得られている。

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

重 力 波 天 **81**(157)

報告されたおもな重力波（2024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 $M_c=(M_1M_2)^{3/5}/(M_1+M_2)^{1/5}$ 、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（SNR）を示す。幅のある量は90%の信頼区間。（種類ごとに日付順。BBHについては、GW190521とSNRが17.3より大きいもののみ。）

イベント（BBH）	M_c ($M_{\odot}$)	質量比	χ_{eff}	M_{final} ($M_{\odot}$)	距離（Mpc）	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	28.6 $^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	63.1 $^{+3.4}_{-3.0}$	440 $^{+150}_{-170}$	250	26
GW170814	24.1 $^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	53.2 $^{+3.2}_{-2.4}$	600 $^{+150}_{-220}$	92	17.7
GW190412	13.3 $^{+0.5}_{-0.5}$	0.32	$0.21^{+0.12}_{-0.13}$	35.6 $^{+4.8}_{-4.5}$	720 $^{+240}_{-220}$	240	19.8
GW190521	63.3 $^{+19.6}_{-14.6}$	0.58	$-0.14^{+0.5}_{-0.45}$	147.4 $^{+40.0}_{-16.0}$	3310 $^{+2790}_{-1800}$	1000	14.3
GW190521_074359	32.8 $^{+3.2}_{-2.8}$	0.77	$0.1^{+0.13}_{-0.13}$	72.6 $^{+6.5}_{-5.4}$	1080 $^{+580}_{-530}$	470	25.9
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 $^{+9.6}_{-7.5}$	0.72	$-0.29^{+0.42}_{-0.31}$	107 $^{+18.0}_{-15.0}$	1290 $^{+1130}_{-650}$	1600	17.3
GW191204_171526	8.56 $^{+0.41}_{-0.28}$	0.72	$0.16^{+0.08}_{-0.05}$	19.18 $^{+1.71}_{-0.93}$	640 $^{+200}_{-260}$	350	17.4
GW191216_213338	8.33 $^{+0.22}_{-0.19}$	0.64	$0.11^{+0.13}_{-0.06}$	18.87 $^{+2.81}_{-0.93}$	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	$0.11^{+0.11}_{-0.16}$	60.2 $^{+4.1}_{-3.2}$	890 $^{+260}_{-370}$	130	26.8
GW200224_222234	31.1 $^{+3.3}_{-2.7}$	0.82	$0.1^{+0.15}_{-0.16}$	68.7 $^{+6.7}_{-4.8}$	1710 $^{+500}_{-650}$	50.0	20
GW200311_115853	26.6 $^{+2.4}_{-2.0}$	0.81	$-0.02^{+0.16}_{-0.2}$	59 $^{+4.8}_{-3.9}$	1170 $^{+280}_{-400}$	35	17.8
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	$-0.08^{+0.21}_{-0.43}$	11.8 $^{+3.0}_{-2.8}$	720 $^{+300}_{-310}$	2100	8.3
GW200115_042309	2.43 $^{+0.05}_{-0.07}$	0.24	$-0.15^{+0.23}_{-0.42}$	7.4 $^{+1.7}_{-1.7}$	290 $^{+150}_{-100}$	370	11.3
GW230529_181500	1.94 $^{+0.04}_{-0.04}$	0.39	$-0.1^{+0.12}_{-0.17}$	5.1 $^{+0.6}_{-0.6}$	201 $^{+102}_{-96}$	—	11.6

* KAGRAは、能登半島地震でダクヘジから復帰し、2025年初旬に観測を再開する。

2025年初旬

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

重力波の生成機構 一般相対性理論によれば、大質量でコンパクトな天体が加速度運動することにより、重力波が発生する。重力波源としては連星の合体や超新星爆発、非球対称な星の高速回転や、宇宙初期に起源をもつ重力波が宇宙空間を伝播していると考えられる。これらのうち、データとの相関解析を可能にする波形予測ができるのは、連星合体からの重力波である。十分に合体前はニュートン力学に相対論補正を加えたポスト・ニュートン展開により、合体前後は数値シミュレーションにより、合体後ブラックホールが生じる場合にはブラックホール時空の摂動によっても波形モデルが得られる。これらのモデルと重力波干渉計で得られる信号の相関をとることで、連星ブラックホール（以下 BBH）や連星中性子星（BNS）、および中性子星・ブラックホール連星（NSBH）の合体現象による重力波の検出、および、パラメータ推定が 2015 年以来可能になった。						
重力波の観測 これまでに、米欧のレーザー干渉計 LIGO, Virgo によって、 O4a と呼ばれる観測期間終了までに、BBH 波源の重力波が 169 例、BNS 波源が 2 例、NSBH 波源が 3 例、片方が BH で相方が不明なもの 1 例、 片方が NS で相方が不明なもの 1 例 の合計 176 例が、波源のパラメータを含めて 報告されている。日本の KAGRA（かぐら）も O3b の最後に共同観測に入った。KAGRA は能登半島地震でのダメージから復帰して 2025 年 6 月に観測を再開した。O4 観測は、2025 年 11 月まで行われ た 。その後、世界中の干渉計は精度向上のためのアップグレードを行い、O5 観測は 2028 年より行われる。						
重力波イベントは、観測された年月日を用いて、GW150914 の形で命名される。O3a 期より、時分秒を加えた名称が正式となった。重力波イベントは速報体制が取られ、多波長電磁波追観測が可能になっているが、これまでに波源が特定されたのは GW170817 のみである。						
重力波レーザー干渉計の位置と腕の向き (例えば N 36° W は、北から西方に 36° の向きを指す。)						
干渉計	所在地	腕長 (km)	緯度	経度	X-腕	Y-腕
LIGO Hanford	米国	4	46°27'19″ N	119°24'28″ W	N 36° W	W 36° S
LIGO Livingston	米国	4	30 33 46 N	90 46 27 W	W 18° S	S 18° E
Virgo	欧州	3	43 37 53 N	10 30 16 E	N 19° E	W 19° N
KAGRA	日本	3	36 24 36 N	137 18 36 E	E 28.3° N	N 28.3° W
観測期間 (Observing Run) 日付は UTC 表示						
観測期	Advanced LIGO		Advanced Virgo		KAGRA	
	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日	年 月 日
O1	2015 9 12	–2016 1 19	–		–	
O2	2016 11 30	–2017 8 25	2017 8 1	–2017 8 25	–	
O3a	2019 4 1	–2019 9 30	同左		–	
O3b	2019 11 1	–2020 3 27	同左		(O3GK) 2020 4 7	–2020 4 21
O4a	2023 5 24	– 2024 1 16	–		2023 5 26	–2023 6 25
O4b	2024 4 10	– 2025 1 28	同左		–	
O4c	2025 1 29	– 2025 11 18	同左		2025 6 6 – 2025 11 18	

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

GW150914 最初に報告された重力波直接観測イベント。BBH の存在を明らかにし、太陽質量 ($M_{\odot}$) の 30 倍以上の BH の存在を初めて確認した。GW170817 最初に報告された BNS イベント。直後に多くの追観測がなされ、マルチ・メッセンジャー天文学の初めての成功例となった。重力波波形から得られた中性子星の状態方程式に対する制限は核密度 $\rho_{\text{nuc}} = 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ の 2 倍の密度における圧力として $2\rho_{\text{nuc}} = 3.5^{+2.7}_{-1.7} \times 10^{34} \text{ dyn/cm}^2$ (90% 信頼区間) である。 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・赤外における追観測から鉄以上の重元素合成の形跡が見られ、 r -過程元素合成の重要なチャンネルになっていることを示唆している。GW190412 明らかに質量比の大きな BBH からの重力波で、重力波の高次モードの検出が試みられた。GW190425 2 番目に発見された BNS。GW190521 **合体後の総質量が $150 M_{\odot}$ 程度と考えられる BBH で、**いわゆる中間質量 BH の領域の候補天体の初の発見となった。GW190814 星形成のシナリオでは不可能とされる $2\text{--}5 M_{\odot}$ の質量領域（質量ギャップ）のコンパクト天体からの重力波と考えられる。GW200115: 初めて高い精度で NSBH 合体として報告されたイベント。GW230529_181500 LIGO Livingston でのみ検出されたが、 $1.2\text{--}2.0 M_{\odot}$ と $2.5\text{--}4.5 M_{\odot}$ の連星合体で、一方は NS の質量領域だが他方は質量ギャップ領域**である。GW230627_015337 総質量が $5.78 M_{\odot}$ の最小の BBH。GW231123_135430 総質量が最大の BBH で、**合体後の質量が $190\text{--}265 M_{\odot}$ と推定される。一方のブラックホールは**対不安定型超新星による質量ギャップを超える稀な大質量のものであり、**他方の質量は質量ギャップ中に入り、双方ともに高い自転を持つと推定されることから、GW190521 と同様に BBH の第 2 世代の合体が示唆される。

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

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

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

イベント (BBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{final}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$\Delta\Omega$	SNR
GW150914	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	440^{+150}_{-170}	250	26
GW170814	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	$53.2^{+3.2}_{-2.4}$	600^{+150}_{-220}	92	17.7
GW190412	$13.3^{+0.5}_{-0.5}$	0.32	$0.21^{+0.13}_{-0.13}$	$35.6^{+4.8}_{-4.5}$	720^{+240}_{-220}	240	19.8
GW190521	$63.3^{+19.6}_{-14.6}$	0.58	$-0.14^{+0.5}_{-0.45}$	$147.4^{+40.0}_{-16.0}$	3310^{+279}_{-180}	1000	14.3
GW190521_074359	$32.8^{+3.2}_{-2.8}$	0.77	$0.1^{+0.13}_{-0.13}$	$72.6^{+6.5}_{-5.4}$	1080^{+580}_{-530}	470	25.9
GW191109_010717	$47.5^{+9.6}_{-7.5}$	0.72	$-0.29^{+0.42}_{-0.31}$	$107^{+18.0}_{-15.0}$	1290^{+1130}_{-650}	1600	17.3
GW191204_171526	$8.56^{+0.41}_{-0.28}$	0.72	$0.16^{+0.08}_{-0.05}$	$19.18^{+1.71}_{-0.93}$	640^{+200}_{-260}	350	17.4
GW191216_213338	$8.33^{+0.19}_{-0.19}$	0.64	$0.11^{+0.13}_{-0.06}$	$18.87^{+2.81}_{-0.93}$	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	$0.11^{+0.11}_{-0.16}$	$60.2^{+4.1}_{-3.2}$	890^{+260}_{-370}	130	26.8
GW200224_222234	$31.1^{+3.3}_{-2.0}$	0.82	$0.1^{+0.15}_{-0.16}$	$68.7^{+6.7}_{-4.8}$	1710^{+500}_{-650}	50.0	20
GW200311_115853	$26.6^{+2.4}_{-2.0}$	0.81	$-0.02^{+0.16}_{-0.2}$	$59^{+4.8}_{-3.9}$	1170^{+280}_{-400}	35	17.8
GW230627_015337	$6.02^{+0.16}_{-0.07}$	0.70	$0.02^{+0.08}_{-0.03}$	$13.5^{+0.8}_{-0.5}$	310^{+60}_{-130}	99	28.7
GW230814_230901	$26.8^{+0.8}_{-0.9}$	0.85	$-0.01^{+0.05}_{-0.08}$	$58.9^{+1.8}_{-1.8}$	200^{+100}_{-100}	25000	45.9
GW230914_111401	$39.8^{+7.5}_{-6.3}$	0.60	$0.1^{+0.2}_{-0.2}$	$91.5^{+13.9}_{-9.7}$	2600^{+1600}_{-1200}	1600	17.7
GW230927_153832	$16.4^{+1.7}_{-0.8}$	0.75	$0.02^{+0.07}_{-0.08}$	$36.6^{+3.1}_{-2.1}$	1200^{+400}_{-500}	270	21.5
GW231028_153006	$62.0^{+13.0}_{-10.0}$	0.54	$0.4^{+0.2}_{-0.2}$	145^{+27}_{-14}	4100^{+1400}_{-1800}	1200	22.9
GW231123_135430	102^{+12}_{-31}	0.75	$0.3^{+0.2}_{-0.4}$	225^{+26}_{-43}	2200^{+1900}_{-1500}	1200	22.6
GW231206_233901	$28.1^{+2.6}_{-1.7}$	0.76	$-0.05^{+0.13}_{-0.14}$	$63.0^{+4.7}_{-3.3}$	1500^{+300}_{-500}	310	22.9
GW231226_101520	$32.5^{+1.5}_{-1.3}$	0.88	$-0.09^{+0.08}_{-0.09}$	$71.5^{+3.1}_{-2.5}$	1200^{+200}_{-300}	150	40.7
イベント (BNS)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$\Delta\Omega$	SNR
GW170817	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	0.87	$0^{+0.02}_{-0.01}$	–	$40^{+7.0}_{-15.0}$	16	33
GW190425	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	0.62	$0.07^{+0.07}_{-0.05}$	$3.4^{+0.3}_{-0.1}$	150^{+80}_{-60}	8700	12.4
イベント (NSBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$\Delta\Omega$	SNR
GW190917_114630	$3.7^{+0.2}_{-0.2}$	0.22	$-0.08^{+0.21}_{-0.43}$	$11.8^{+3.0}_{-2.8}$	720^{+300}_{-310}	2100	8.3
GW200115_042309	$2.43^{+0.05}_{-0.07}$	0.24	$-0.15^{+0.23}_{-0.42}$	$7.4^{+1.7}_{-1.7}$	290^{+150}_{-100}	370	11.3
GW230518_125908	$2.80^{+0.06}_{-0.06}$	0.17	$-0.01^{+0.09}_{-0.11}$	$9.4^{+0.7}_{-0.8}$	240^{+110}_{-100}	520	14.3
イベント (低質量ギャップ天体を含む)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$\Delta\Omega$	SNR
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
GW230529_181500	$1.94^{+0.04}_{-0.04}$	0.36	$-0.05^{+0.14}_{-0.15}$	$5.04^{+0.82}_{-0.62}$	200^{+110}_{-100}	24000	11.8



Sの科学 Yの科学

Sの科学

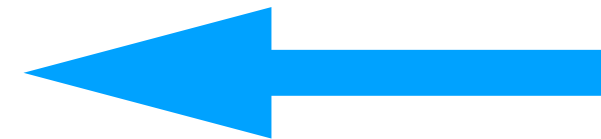
physic**s** 物理
mathematic**s** 数学
statistic**s** 統計学
genetic**s** 遺伝学

Yの科学

astronom**y** 天文学
econom**y** 経済学
biolog**y** 生物学
archaeolog**y** 考古学
anthropolog**y** 人類学
sociolog**y** 社会学

体系化の学問

対象物の性質を理論で説明



発見の学問

対象物を分類し記載

相対性理論

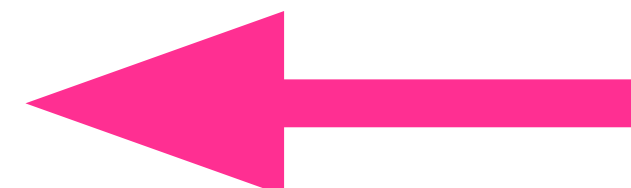


ブラックホール

膨張宇宙

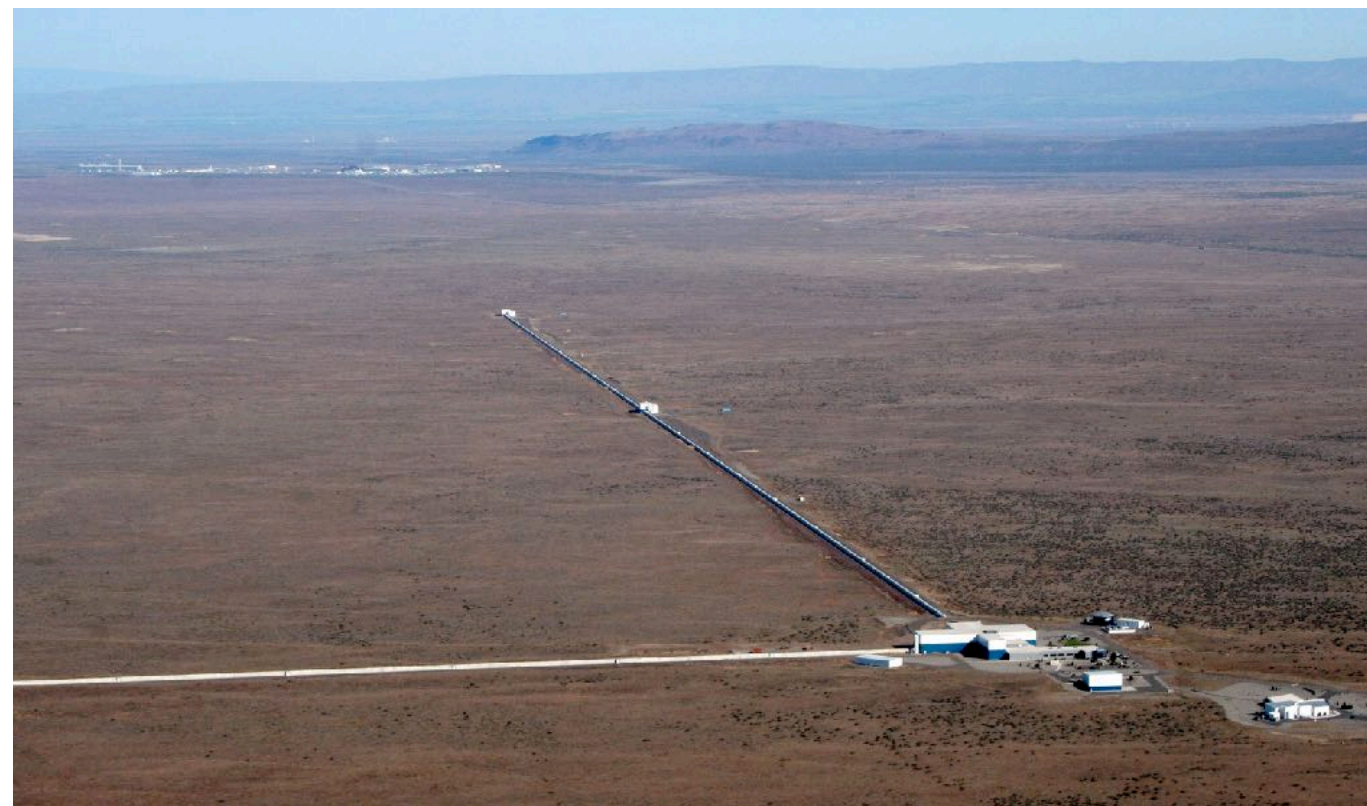
重力波

宇宙物理学



2023年5月から 日米欧で重力波共同観測中

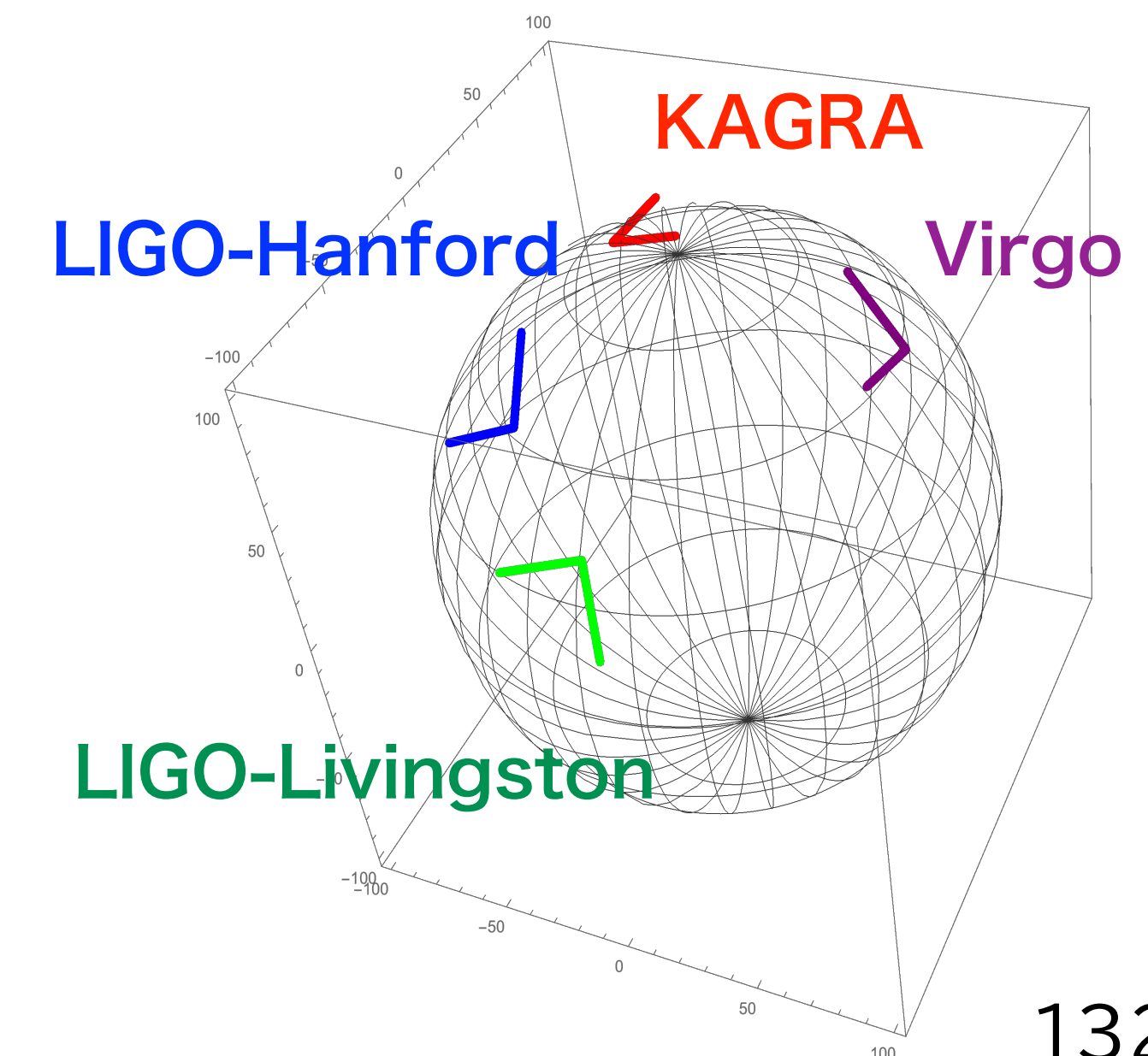
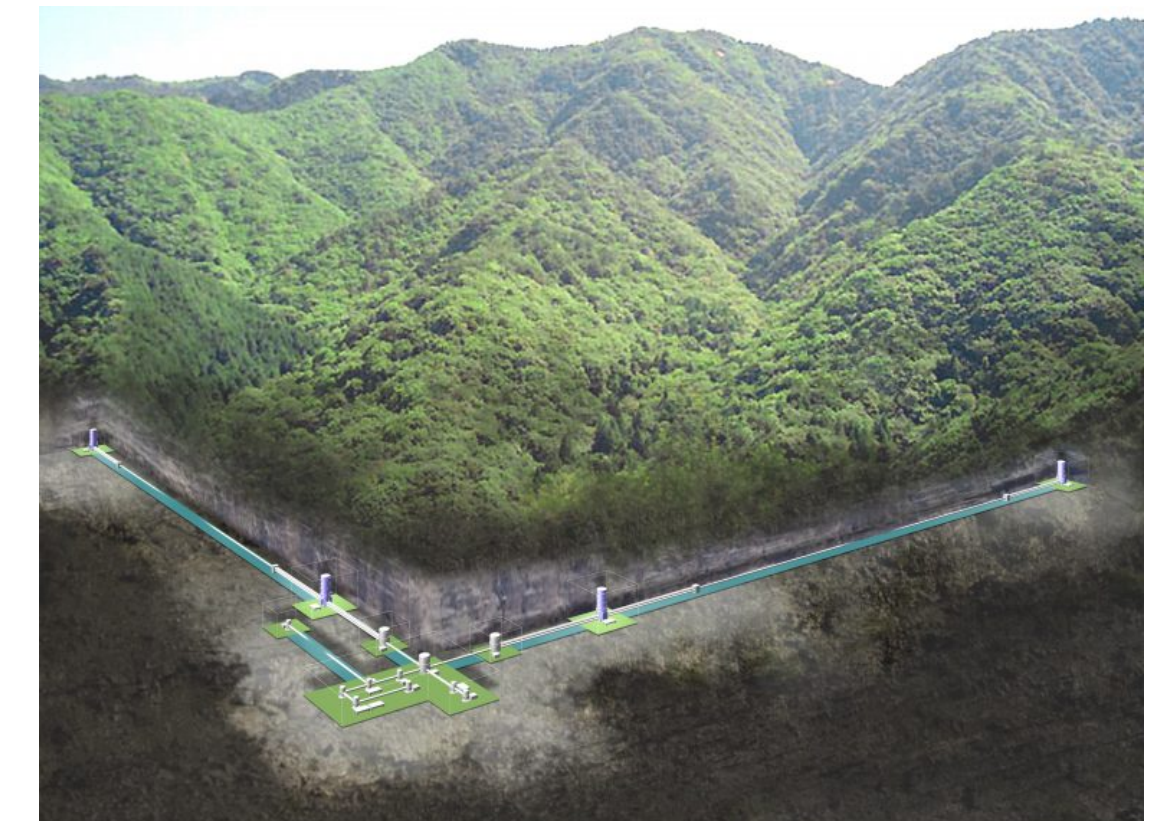
アメリカ・LIGO



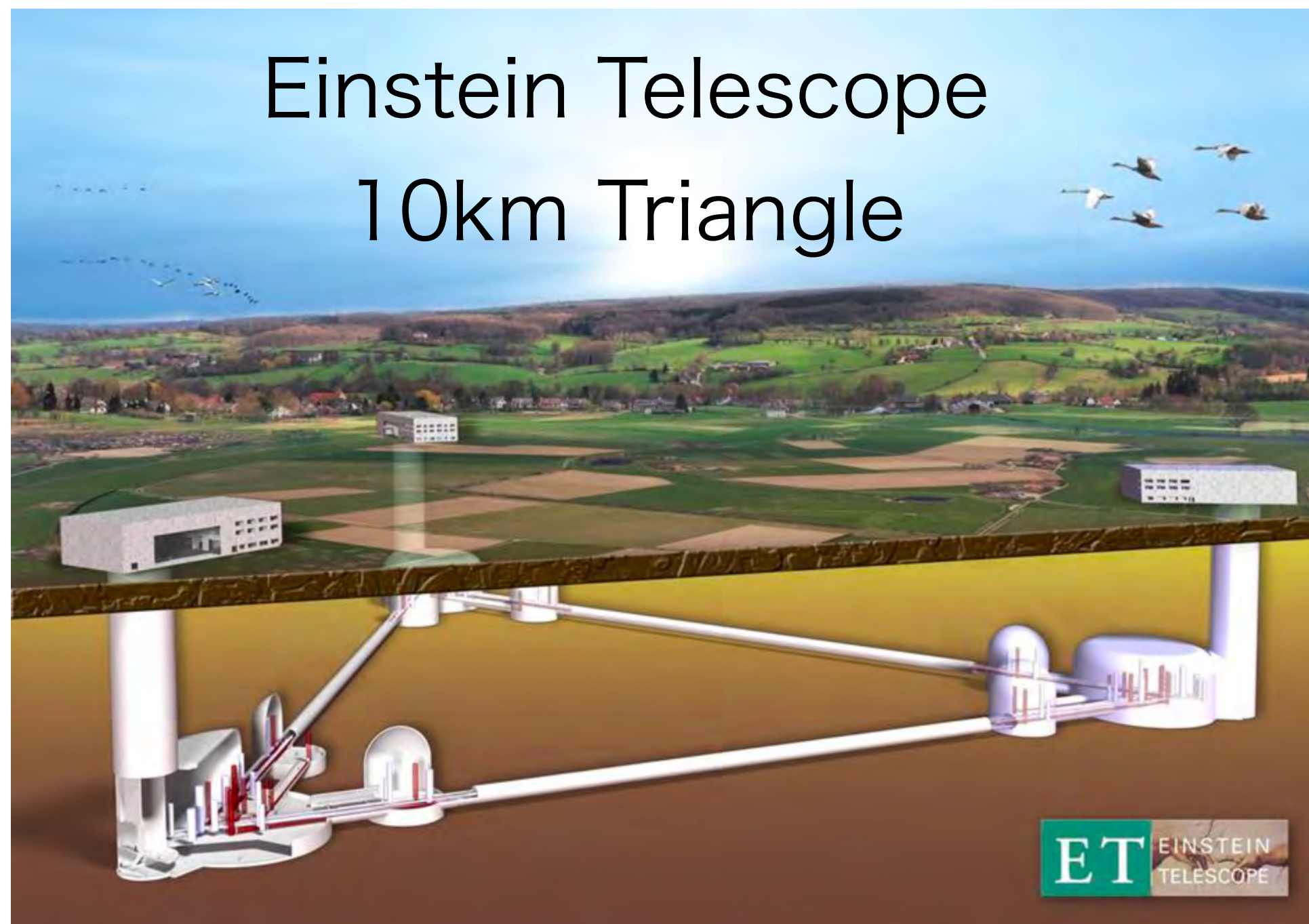
ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)



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

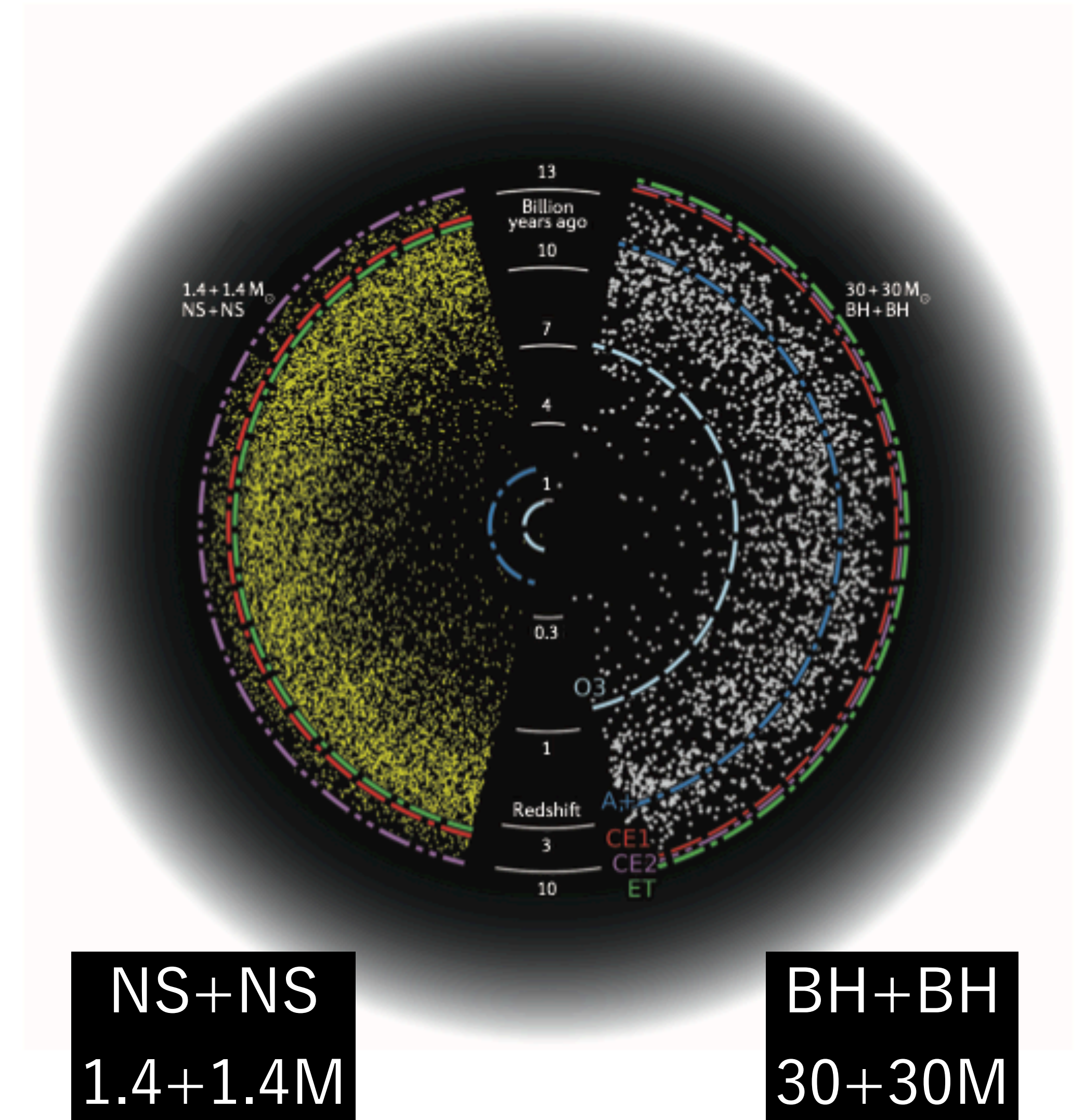
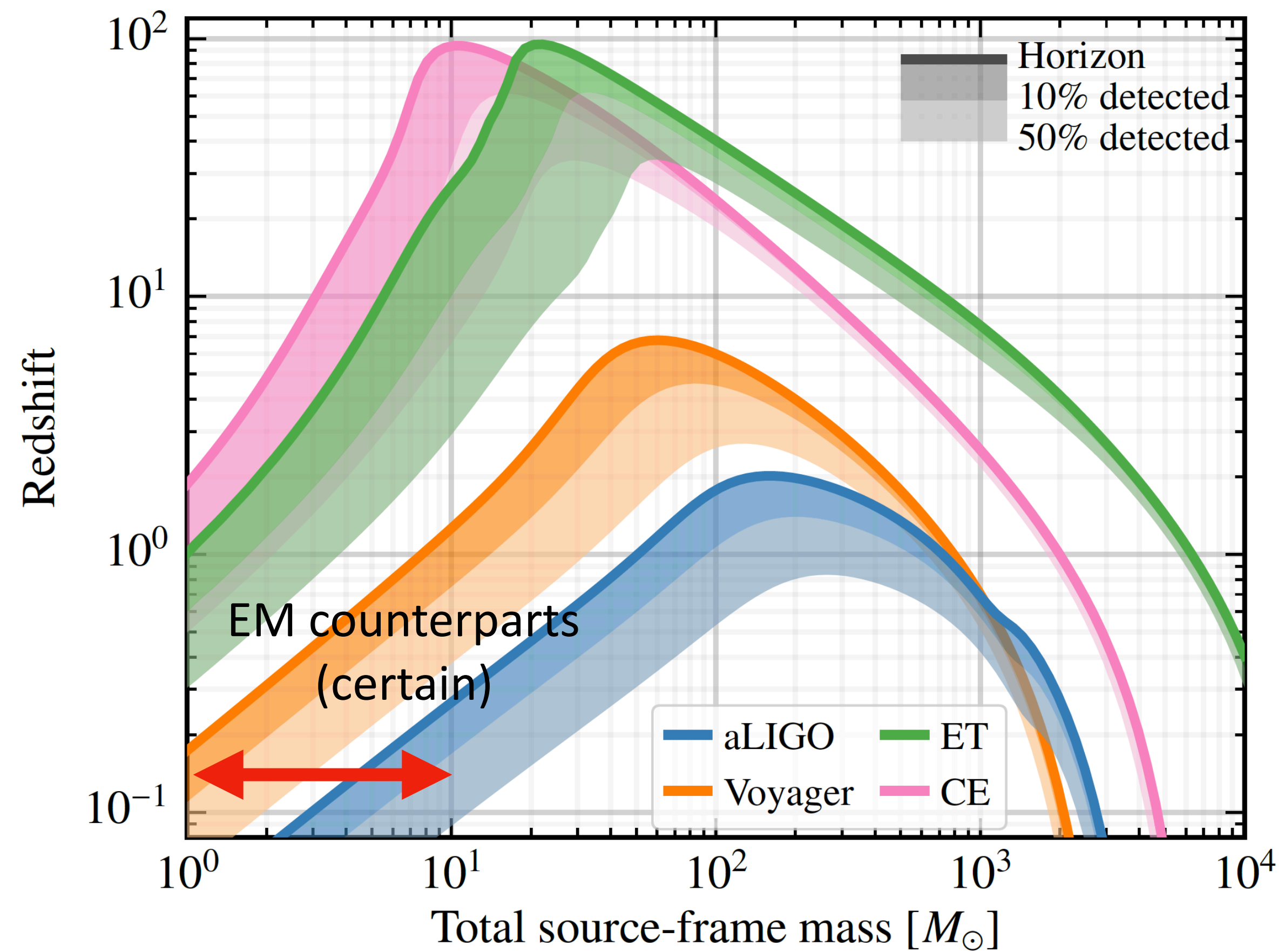
建設地未定(候補地2つ)

アメリカの計画 ▶

予算申請準備

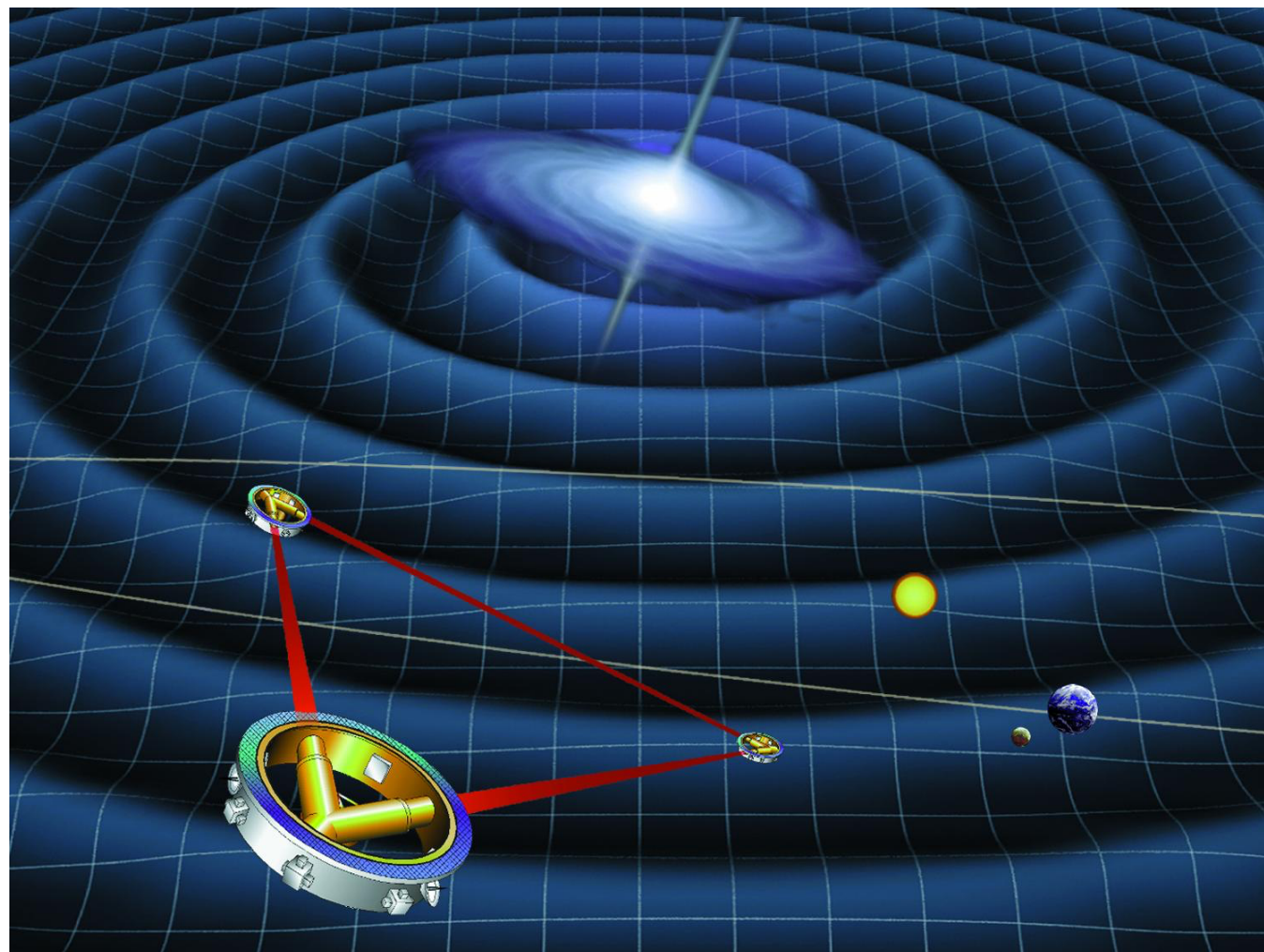


重力波観測装置(地上)の将来計画



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

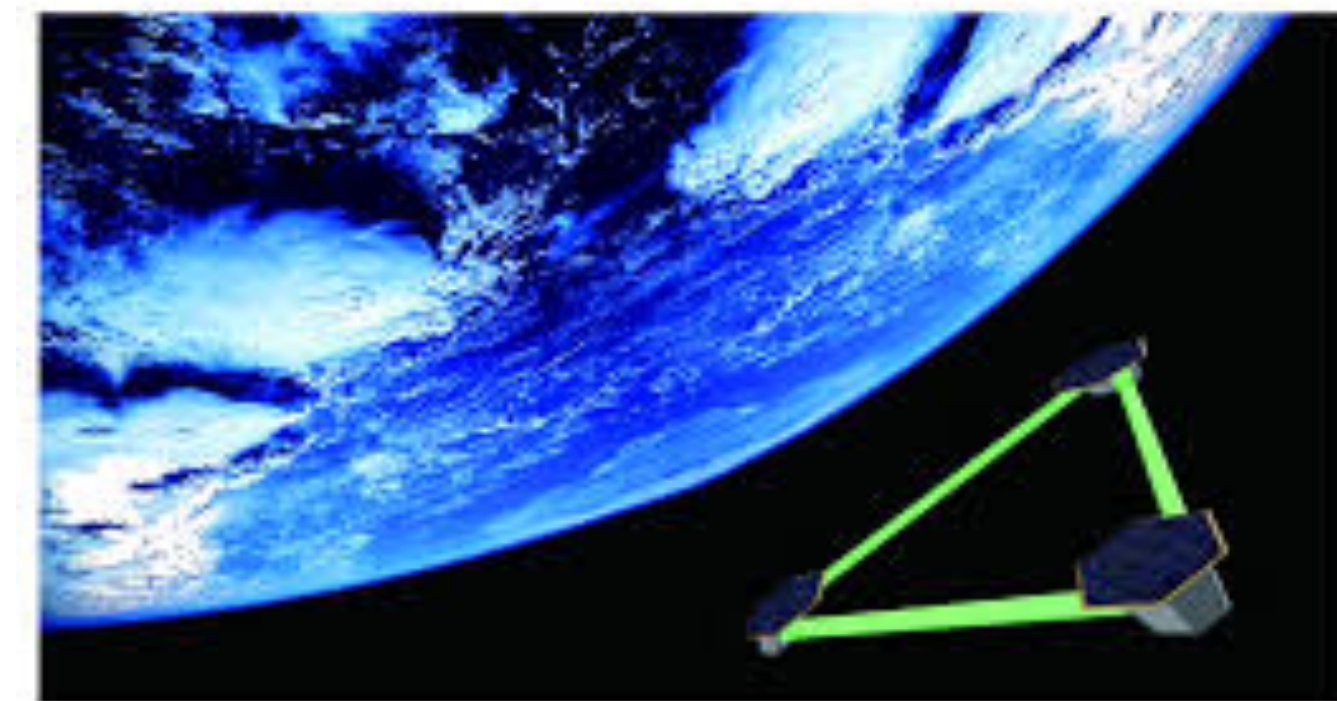
低周波数帯(mHzからHz帯)

日本の計画 ▶

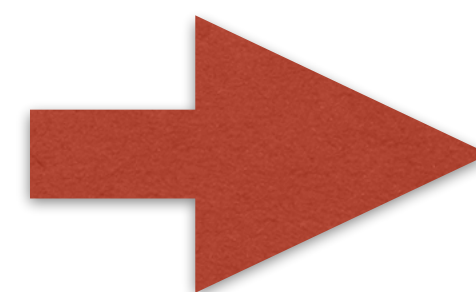
予算申請準備

1000kmの腕の長さ

低周波数帯(deciHzからHz帯)

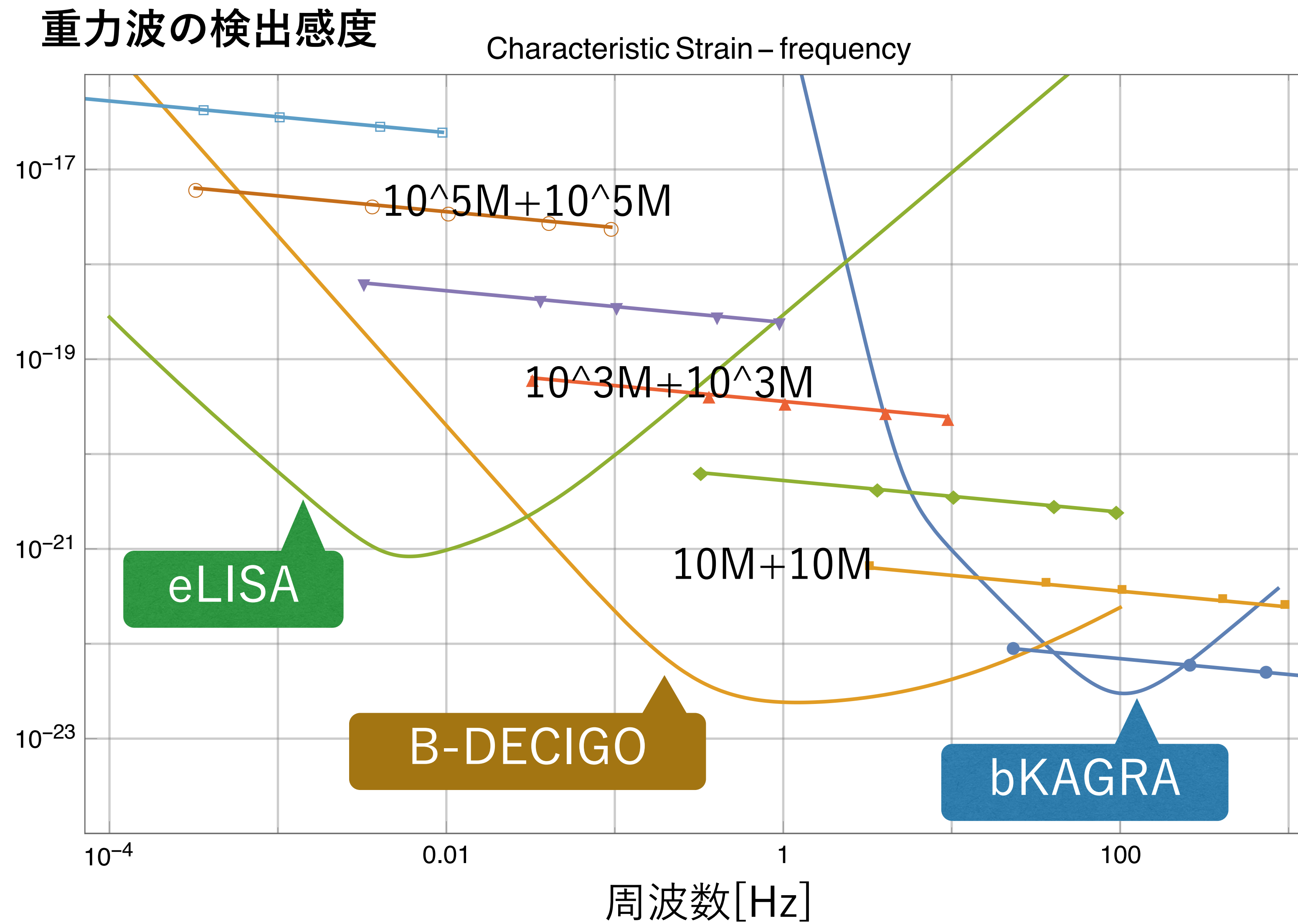


宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる



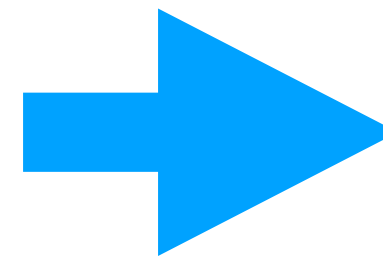
銀河中心の超巨大BH形成過程がわかる
宇宙の膨張速度がわかる

重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



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？

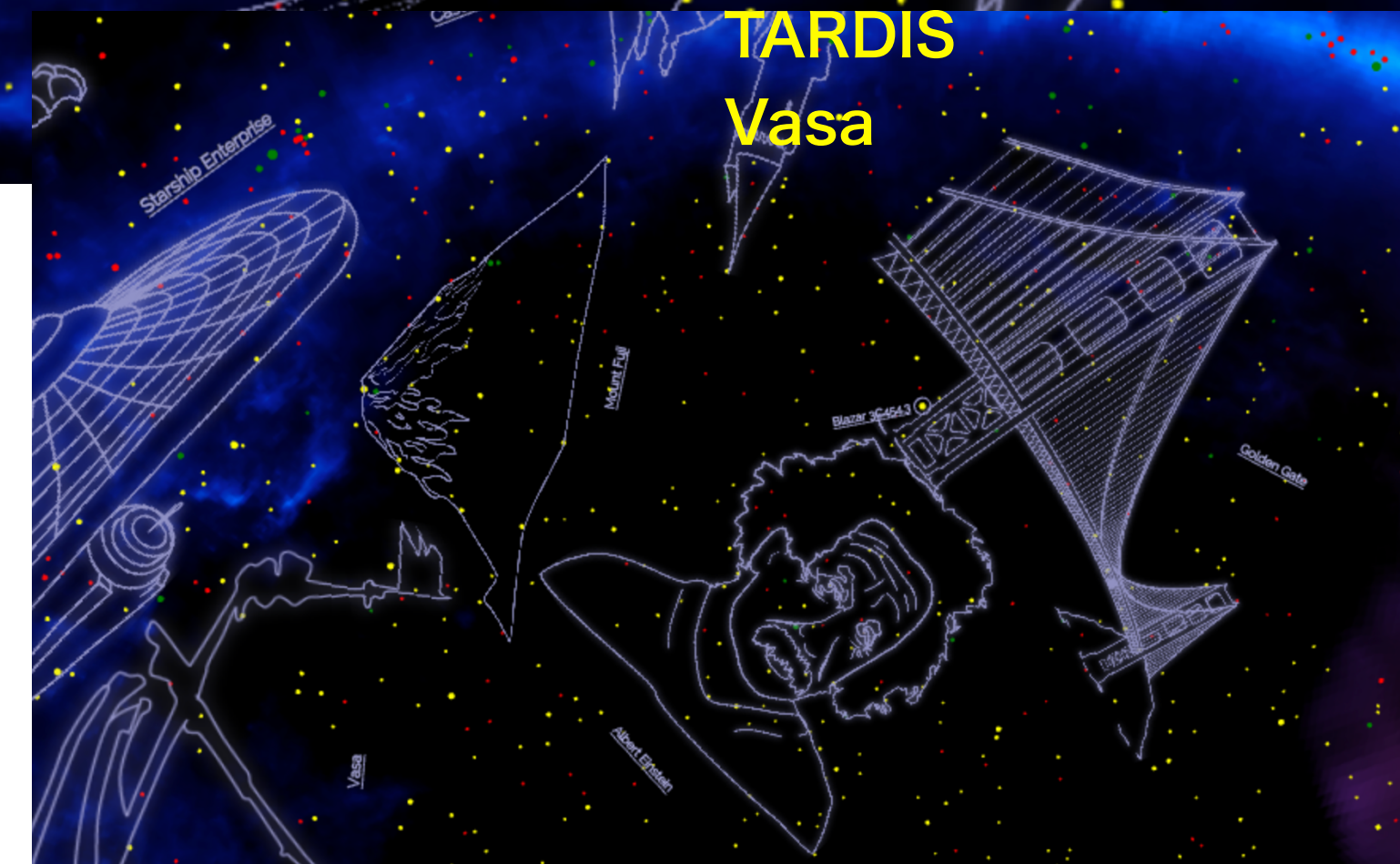
重力波観測は, 物理学から天文学へ

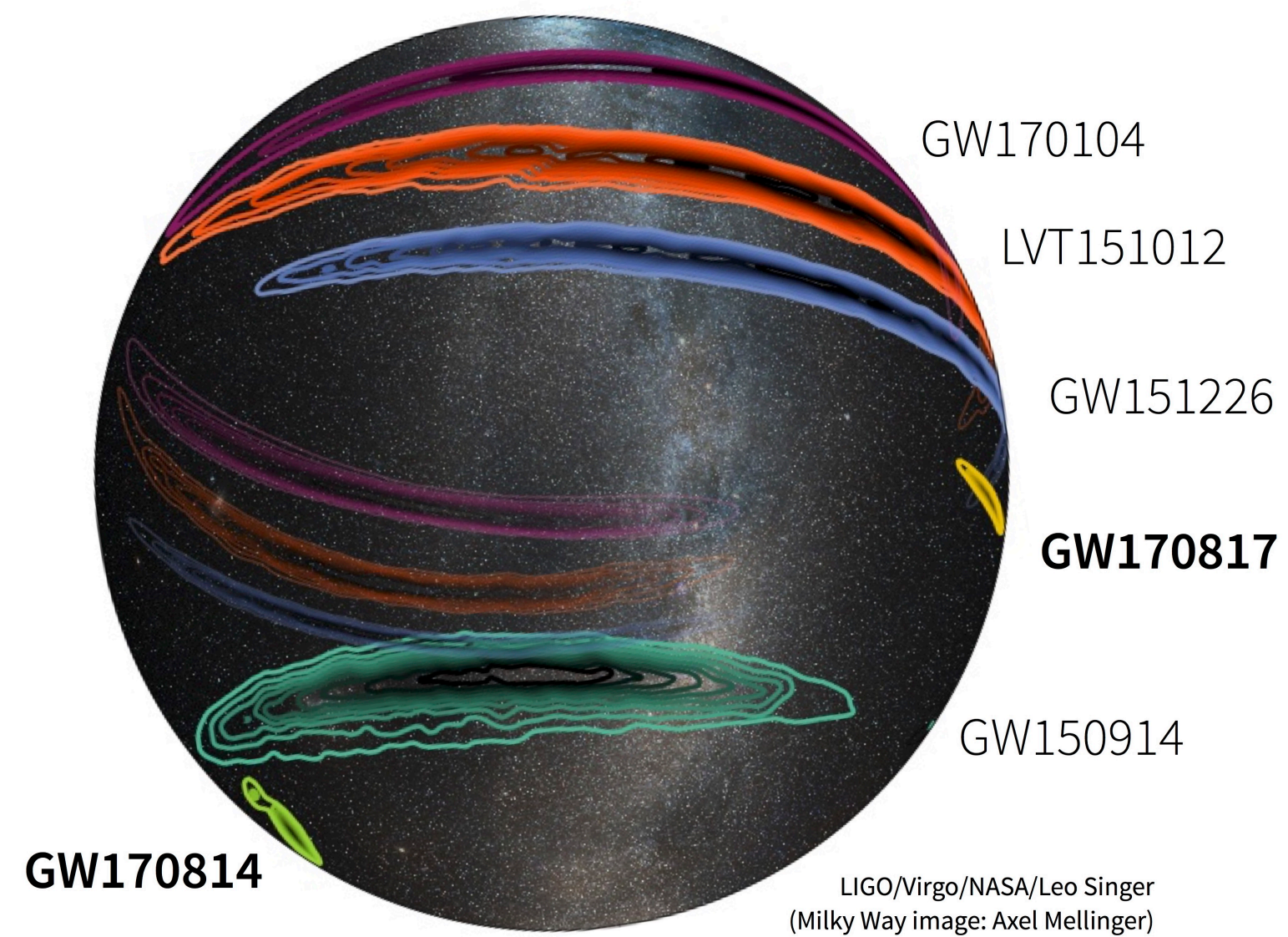


2018/10

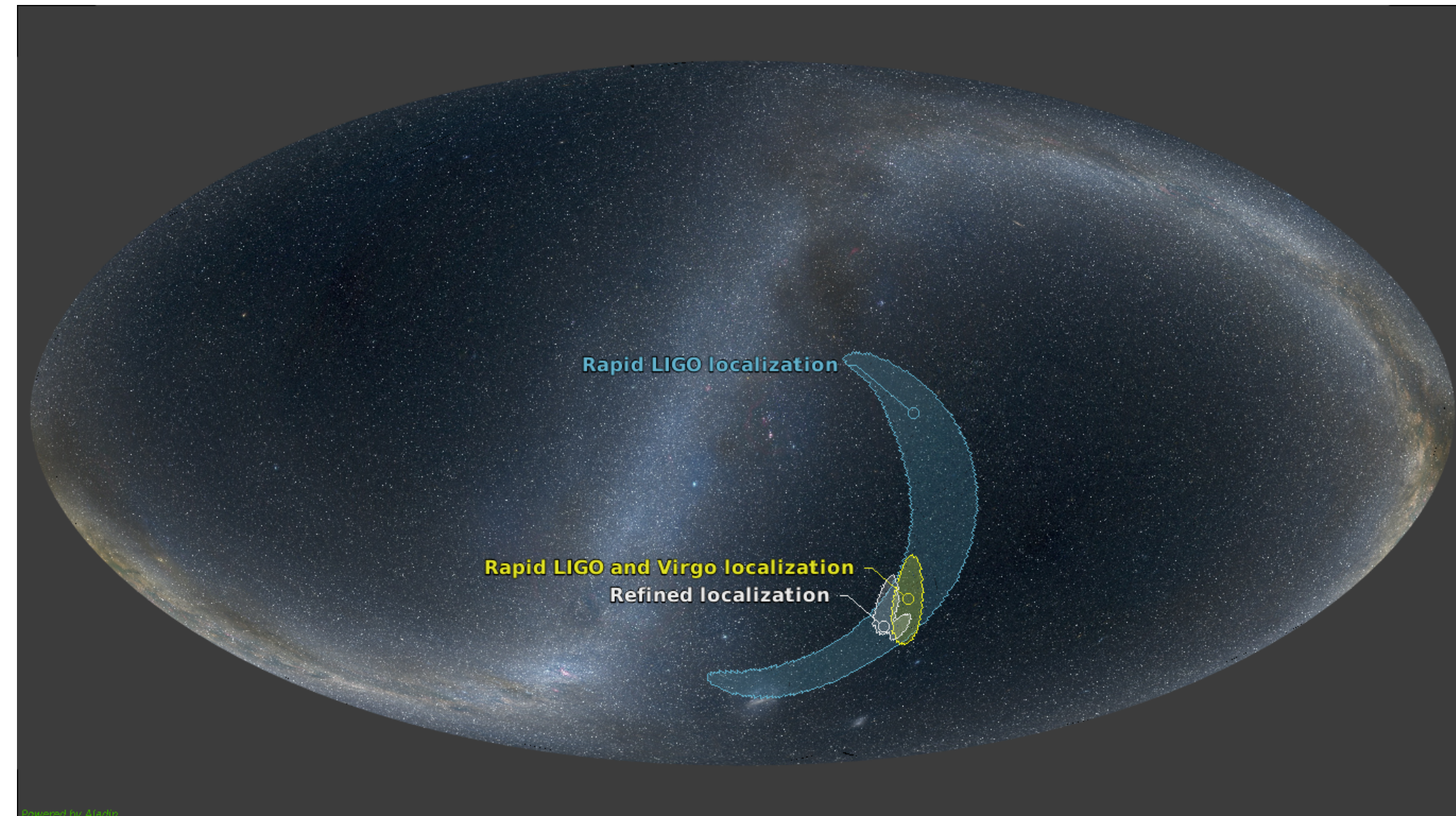
Fermi衛星チーム，ガンマ線バースト天体カ
 タログで21星座を命名

<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。



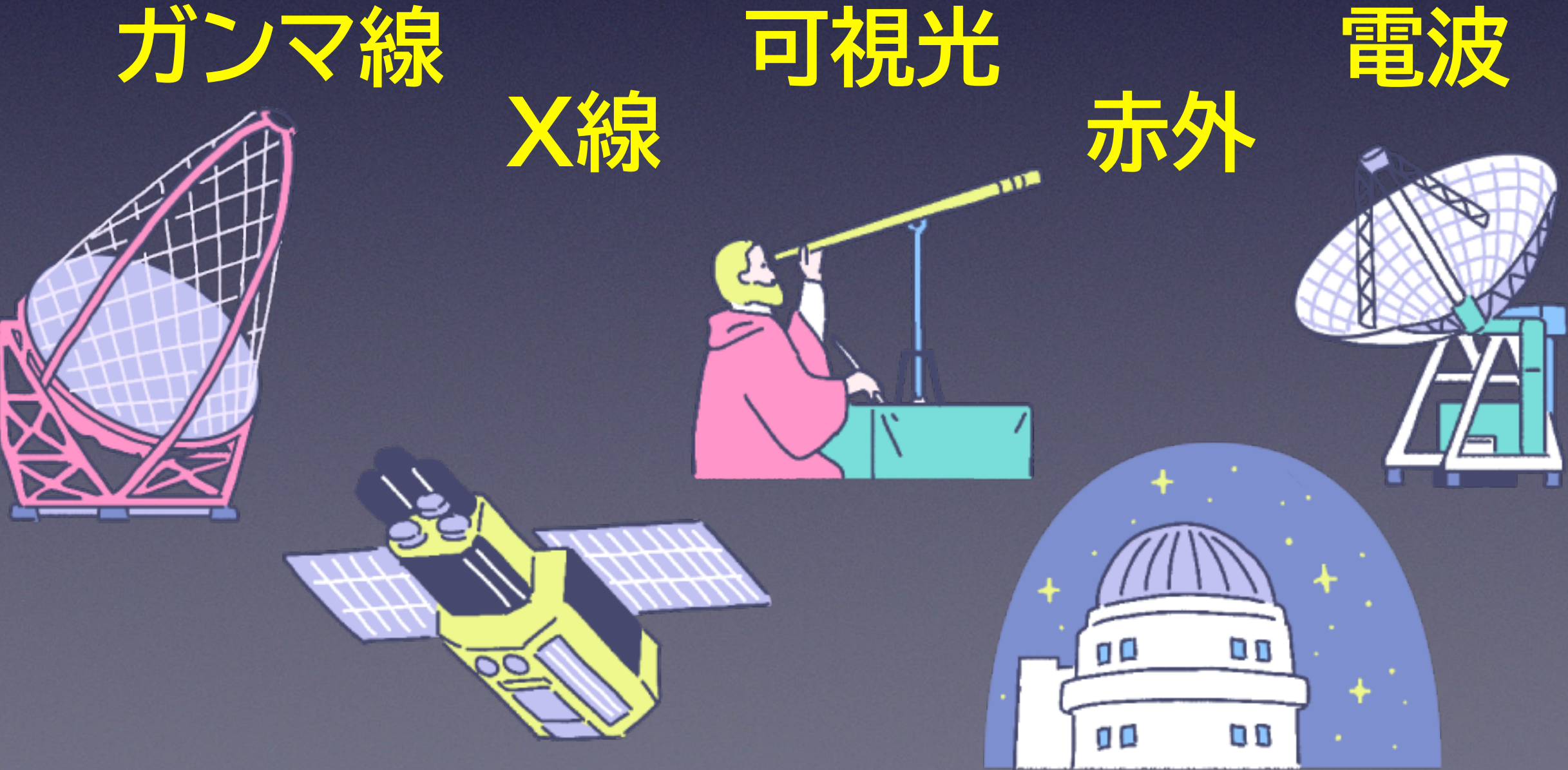
しかし

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 ??

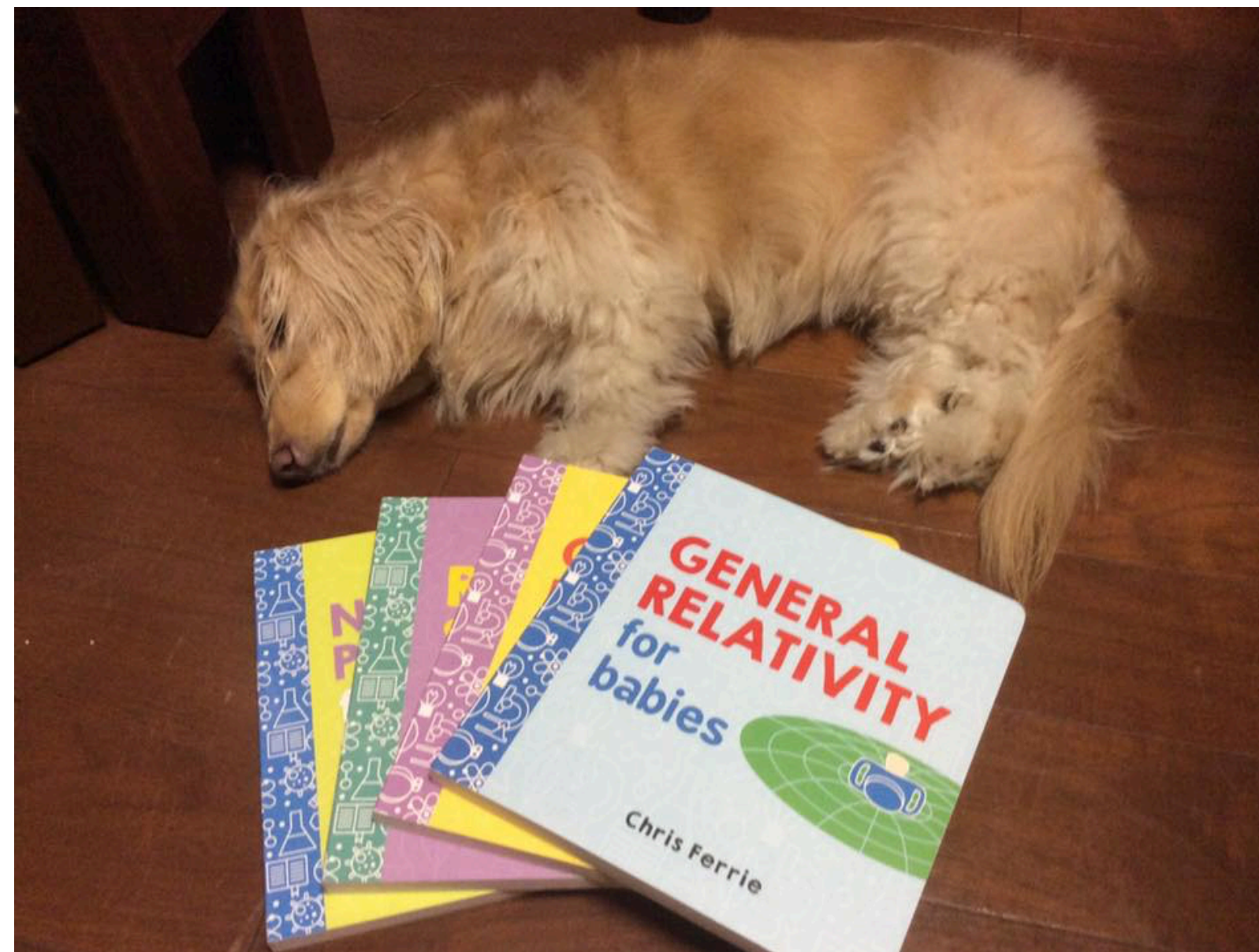
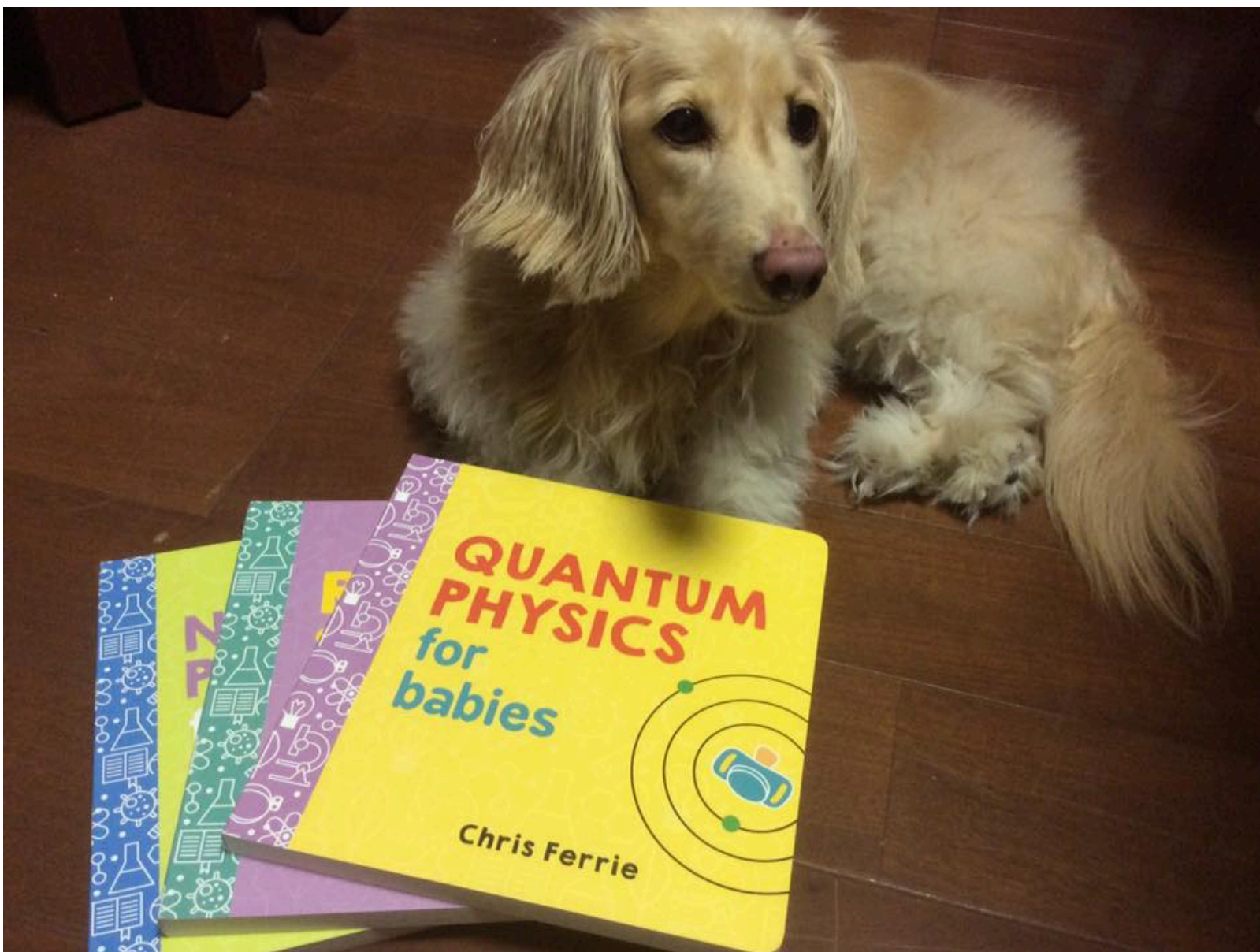
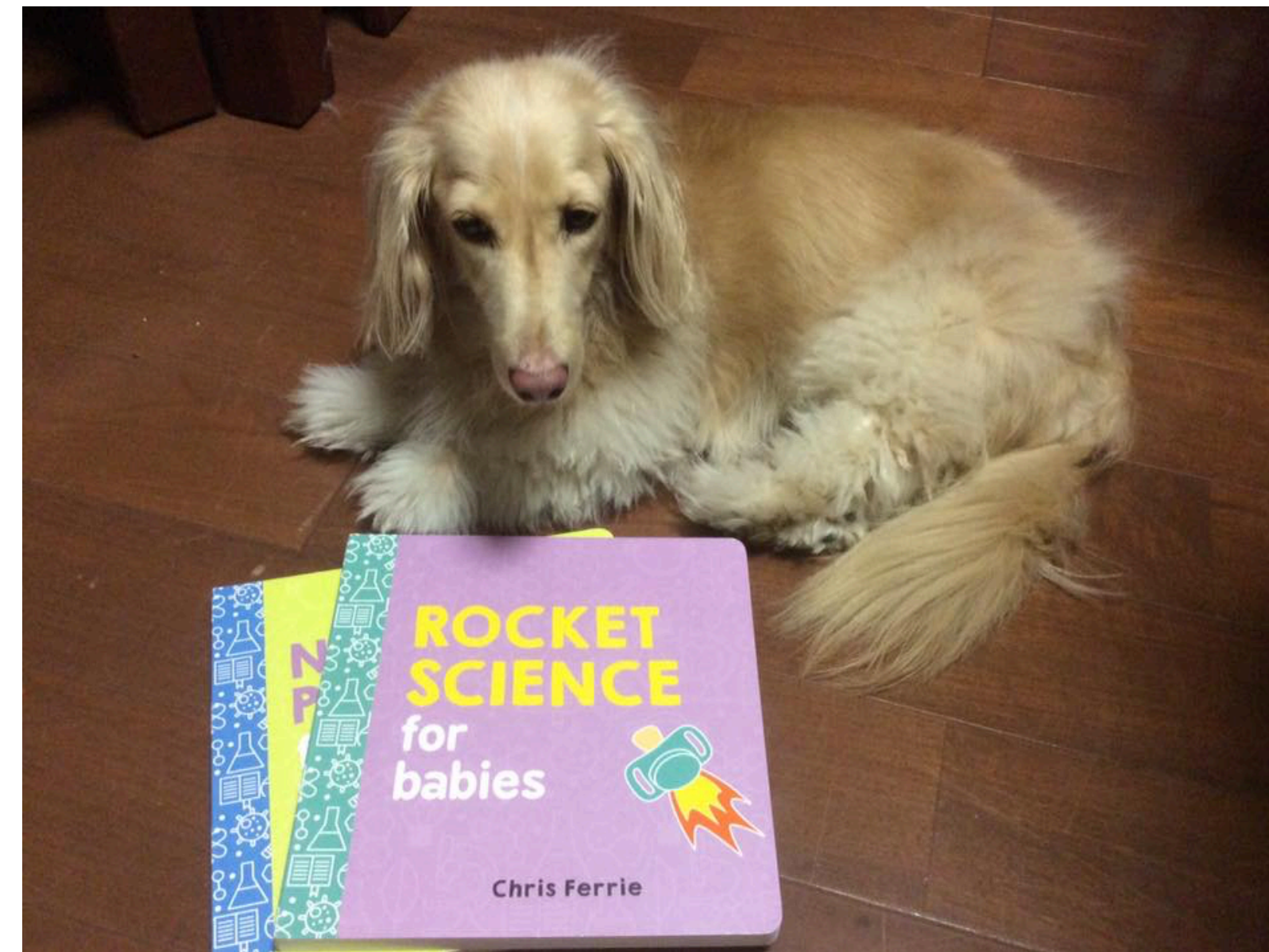
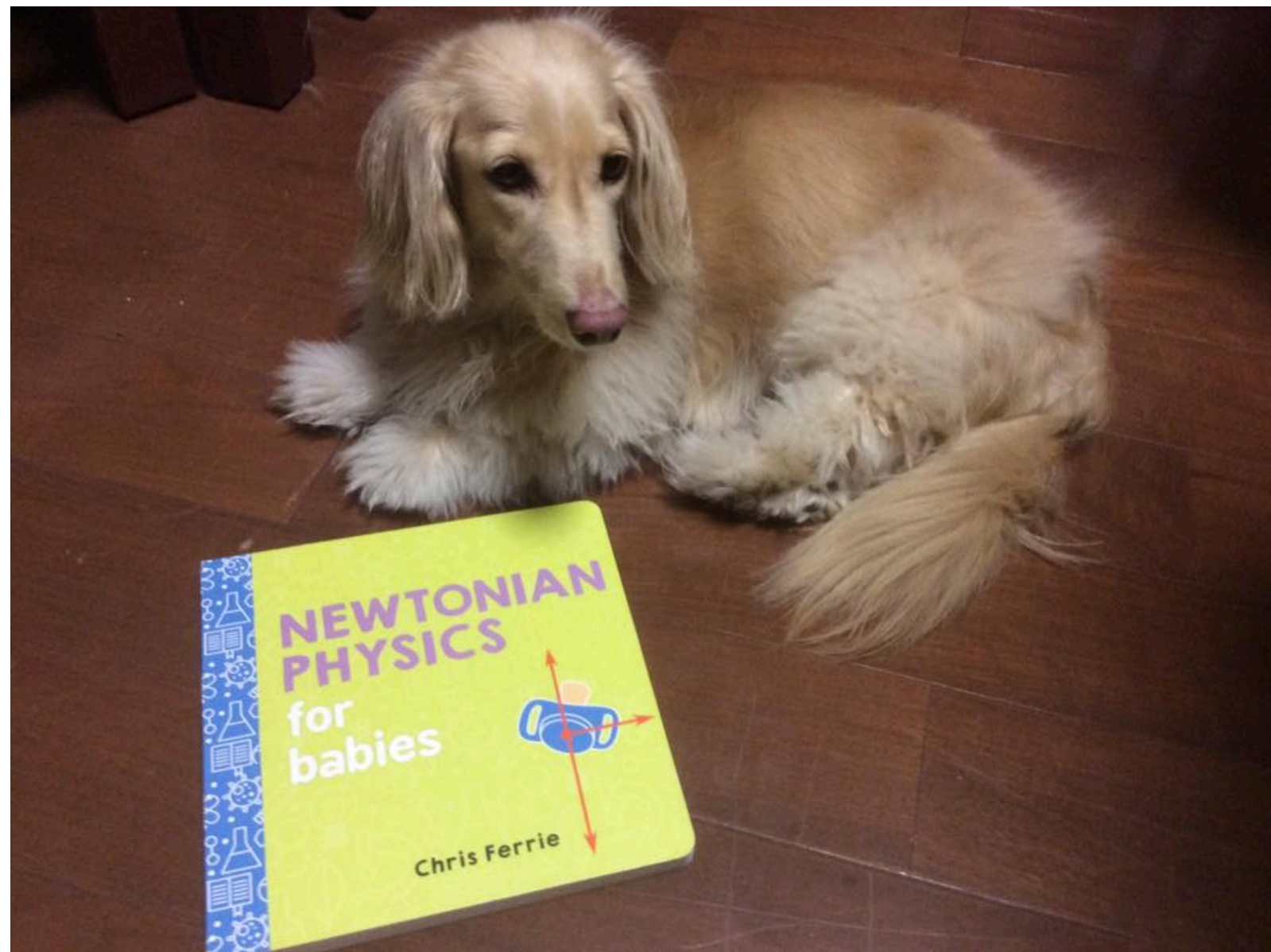
マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

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



重力波





【9-1】(ここまでの復習)

次のそれぞれについて,

特殊相対性理論(**SR**)で説明できる / 一般相対性理論(**GR**)で説明できる / **両方**の理論で説明できる / **別**の理論で説明できる
に分類せよ.

(a) 双子のパラドックス

(e) 核反応の原理

(b) ブラックホール

(f) 重力波

(c) 光の湾曲

(g) ドップラー効果

(d) 未来に行くタイムマシン

(h) 水星の近日点移動

【9-2】通信欄. (感想・講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば)