

ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
3. ブラックホールはどうできた？
4. ブラックホールの未解決問題

2022/1/15

真貝寿明（しんかい ひさあき）

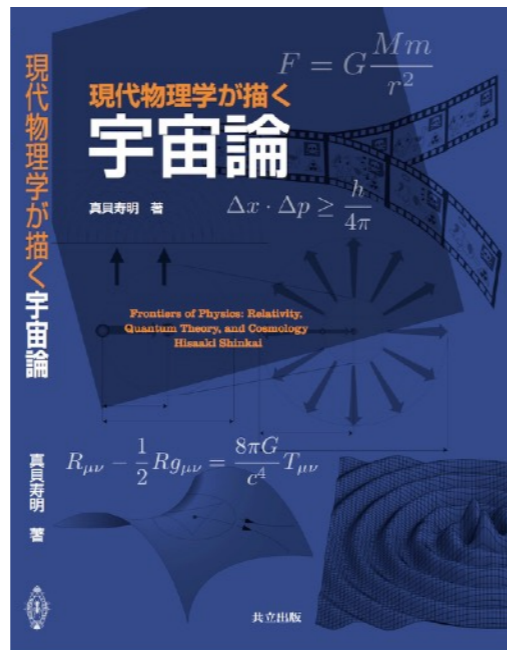
大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

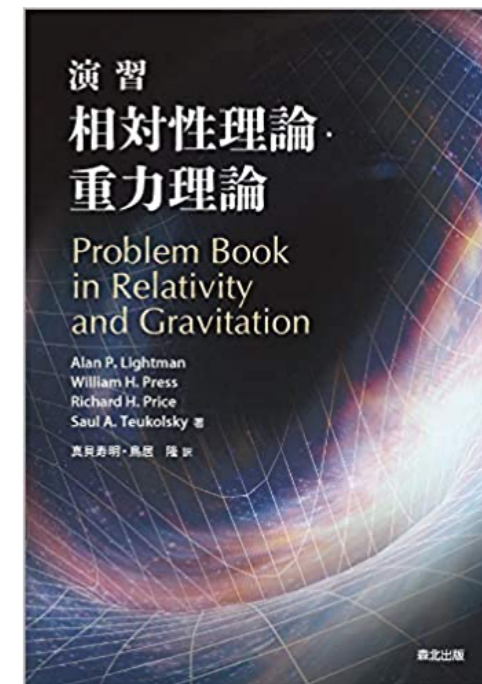
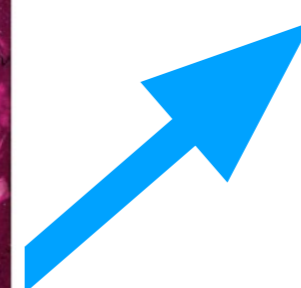
理化学研究所 客員研究員



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



難しい本



易しい本



真貝寿明 (しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

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

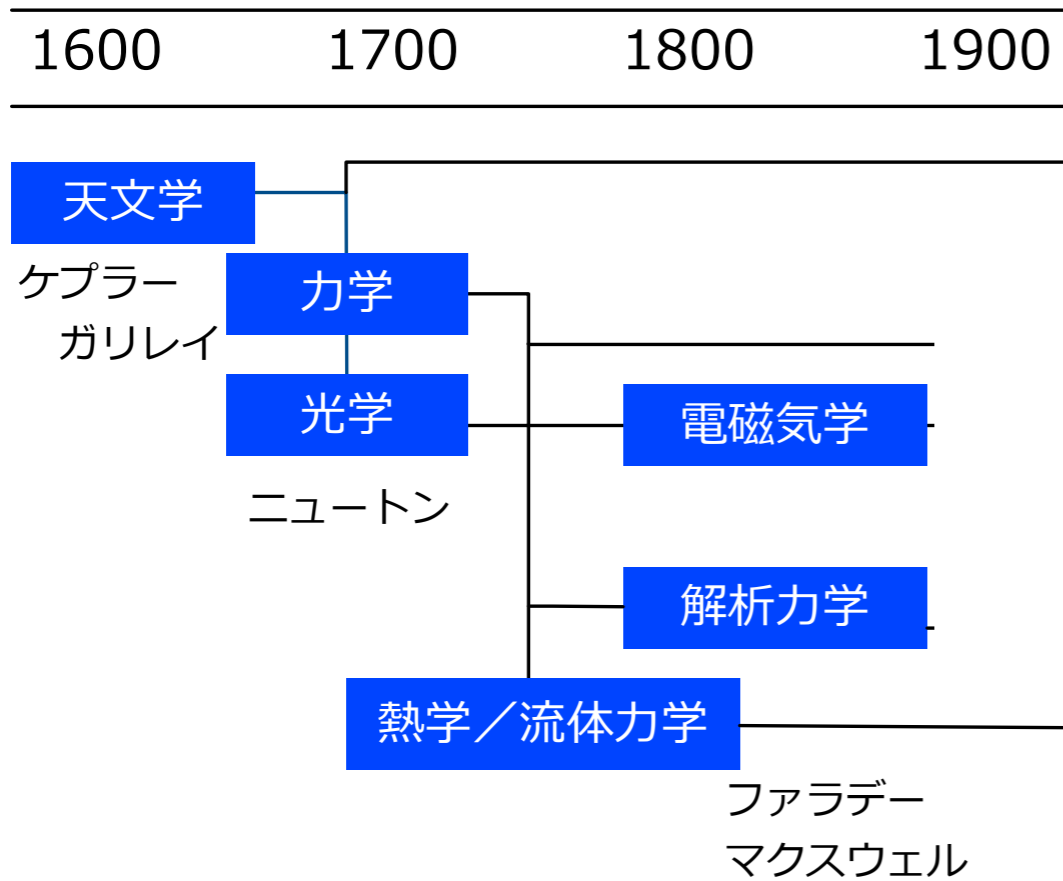


ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. **アインシュタインの相対性理論**
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. ブラックホールはどうできた？
星の進化シナリオ
4. ブラックホールの未解決問題
 - A. 銀河中心ブラックホールの形成
 - B. 時空特異点の問題
 - C. 重力波観測で見つかった正体不明天体
 - D. 相対性理論はどこまで正しい理論か

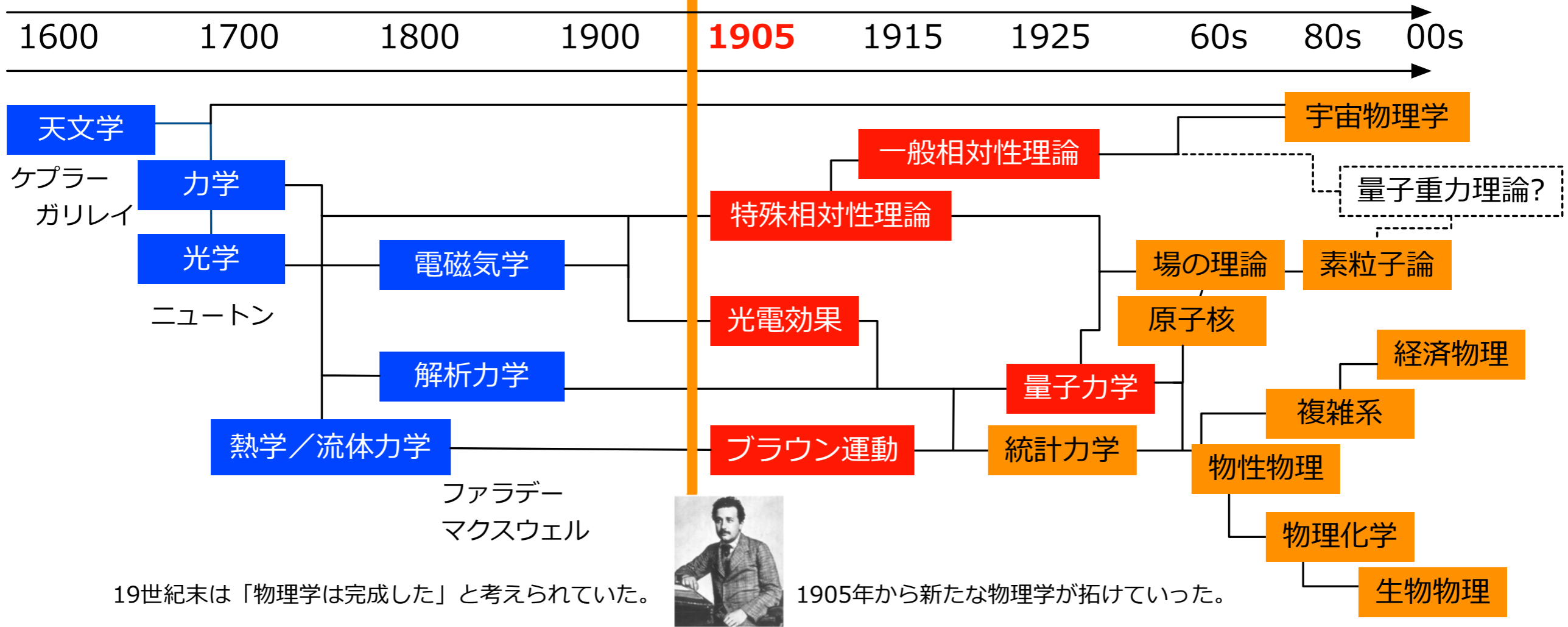
近代物理学の進展



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

近代物理学の進展

現代物理学の進展



これまでの物理学を否定せず、拡張した理論！

特殊相対性理論

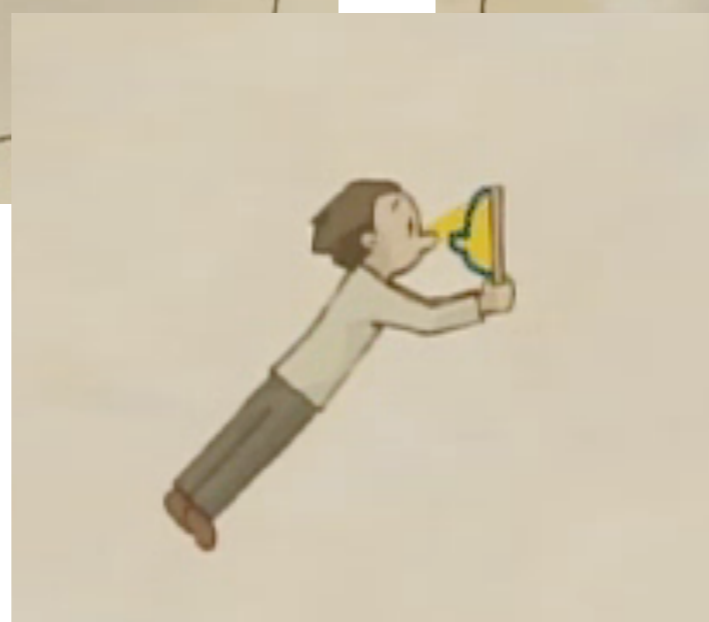
光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

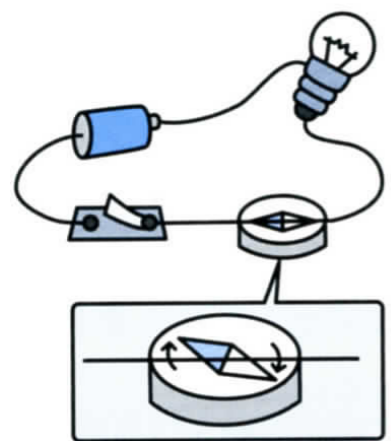
光の速さで動く人が鏡をみると 自分の顔が映るのが見えるのだろうか？



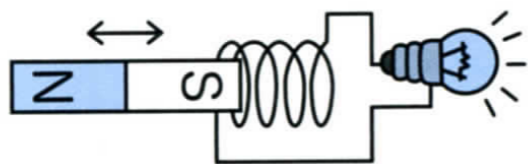
NHK 100分で名著のwebページより.

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

電磁気学の完成から生じた疑問



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。



ファラデー

電磁誘導現象の発見 (1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

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



マクスウェル

Eは電場, Bは磁場
cは光速??

誰が測った光速???

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

光の速さは誰が測っても同じ, と考えてみよう

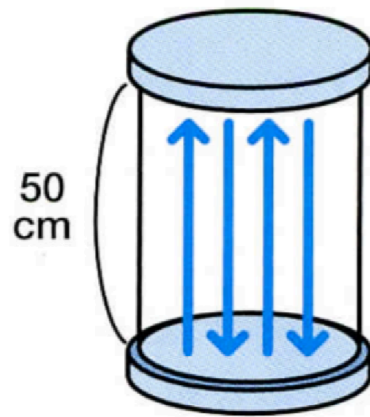
時間の進み方は, 相対的だ. 測定する人の運動状態によって異なる.



アインシュタイン

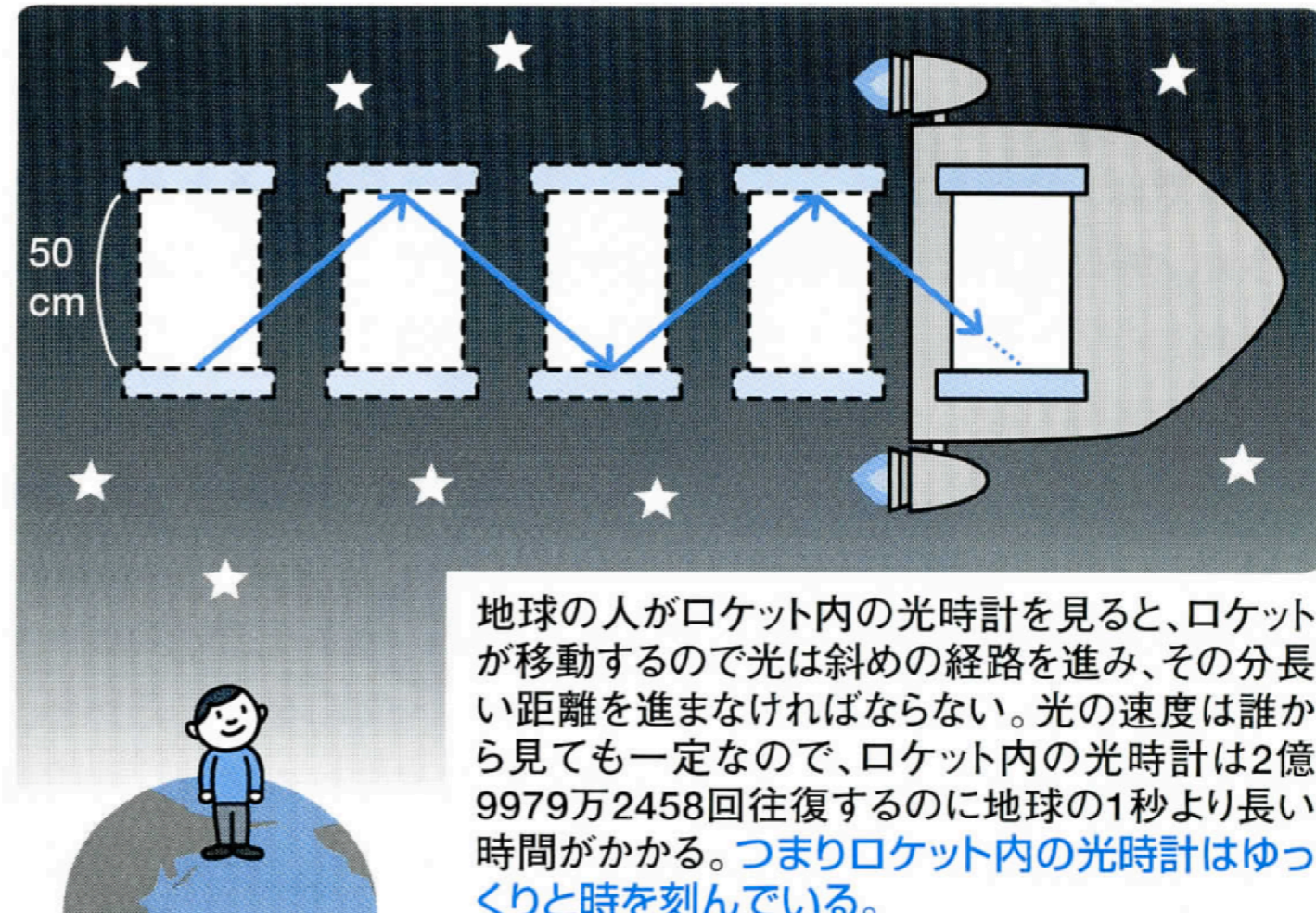
時間の進み方は観測者によって異なる

時間の進み方は**相対的**になる。



光時計

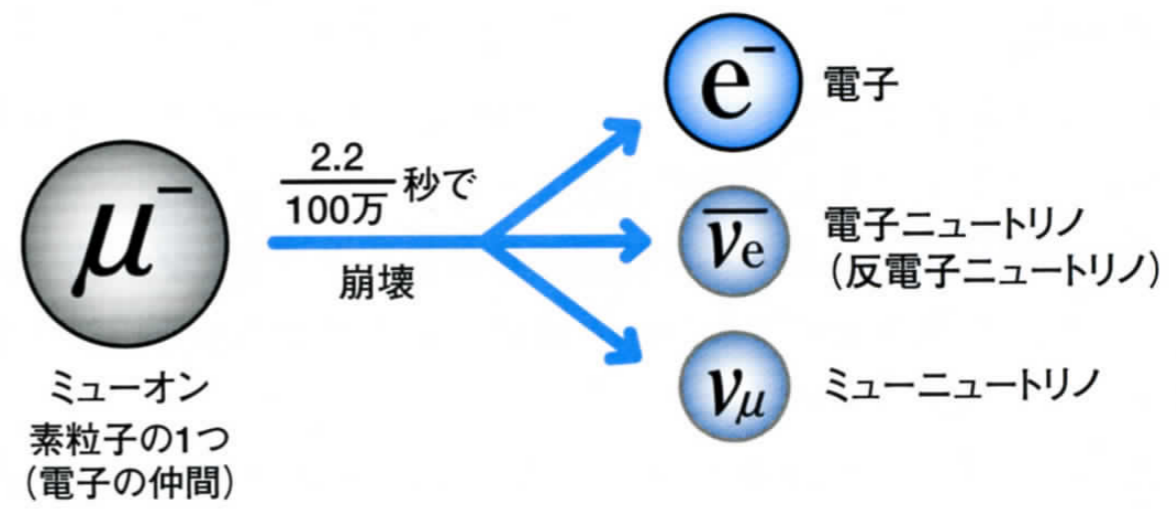
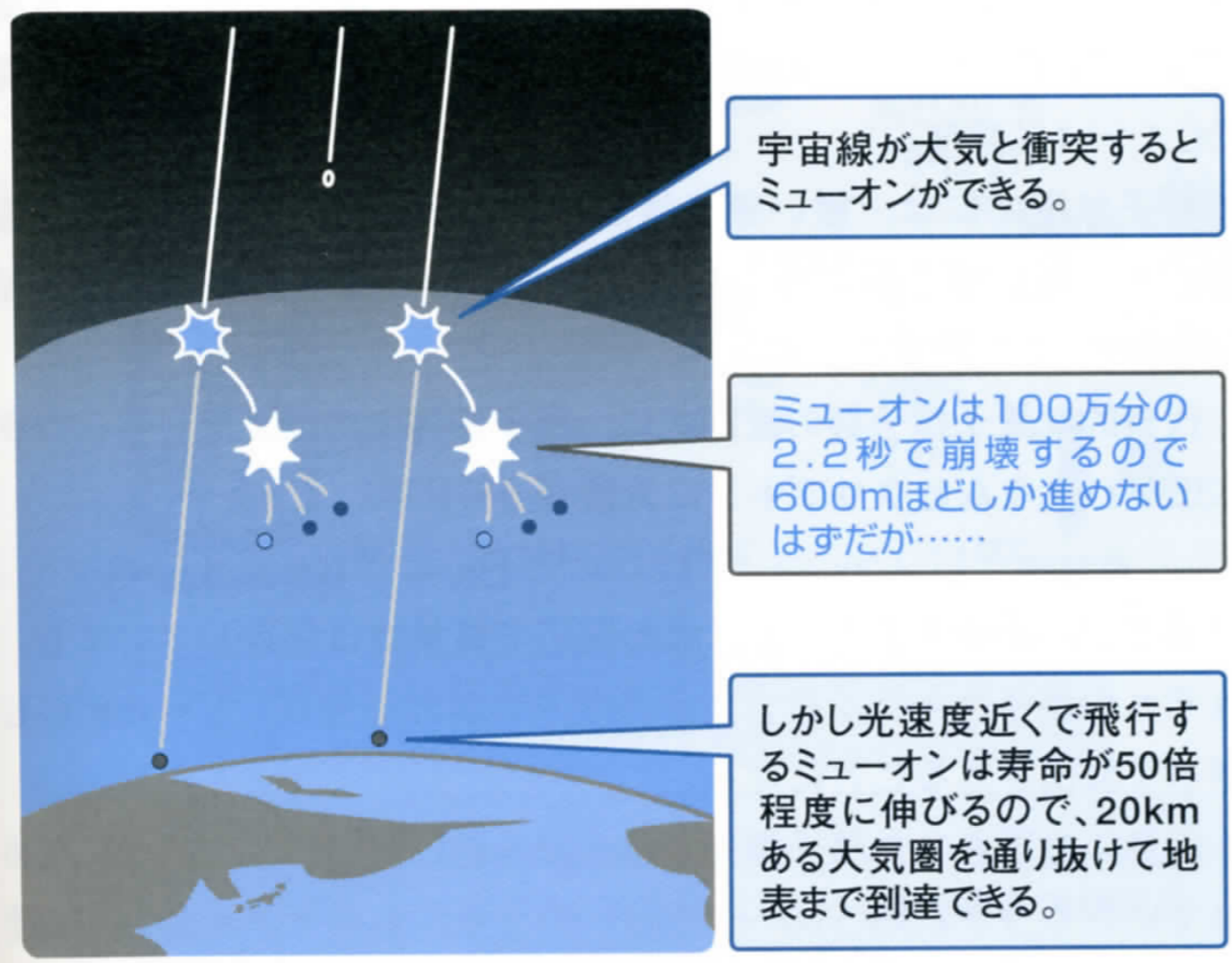
光が2億9979万2458回往復すると「1秒」を刻む時計



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

動いている人の時間の進み方は、静止している人よりも遅い

素粒子の寿命は確かに延びている！



ISSは秒速 7.8km
1年間乗務すると、. . .
0.01067秒 地表より時間が短くなる

特殊相対性理論 (1905年)

x+y+zの空間と、時間座標tを合わせて
4次元で物理を考える必要がある！



26歳のアインシュタイン

ローレンツ変換
(Lorentz transformation)

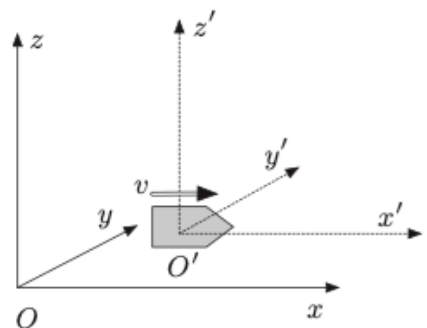


図 3.10 静止している xyz 座標系と、速度 v で x 方向に動いている $x'y'z'$ 座標系。

◆ Advanced ローレンツ変換

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

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

この式は、行列とベクトルの積として、次のようにも書ける。

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

速度が光速に近いと
時間の進み方は遅くなる！

未来へ行けるタイムマシンができる

静止質量エネルギー (エネルギーと質量の等価性)

$$E = mc^2$$

エネルギー保存則を4次元で考えると、
質量そのものがエネルギーだ。

静止質量エネルギー (1905年)
(エネルギーと質量の等価性)

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

$$F = ma$$

ニュートン : リンゴはなぜ落ちる？



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

ニュートン : 万有引力の法則



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>

万有引力の法則

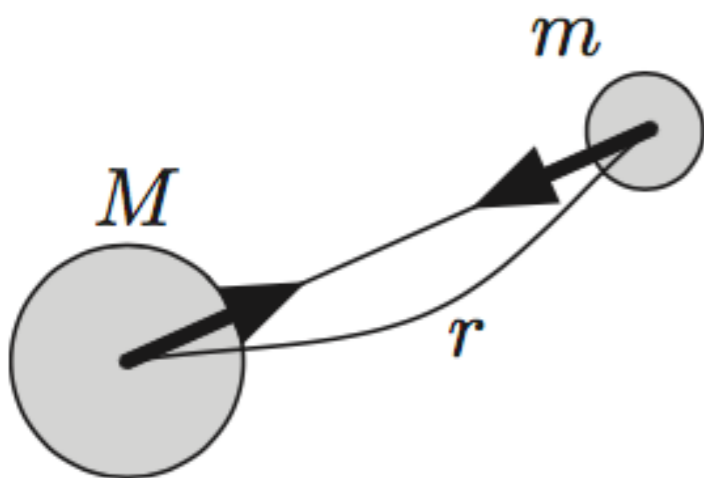
すべてのものは、引力で引き合う

◆ Advanced 万有引力の法則

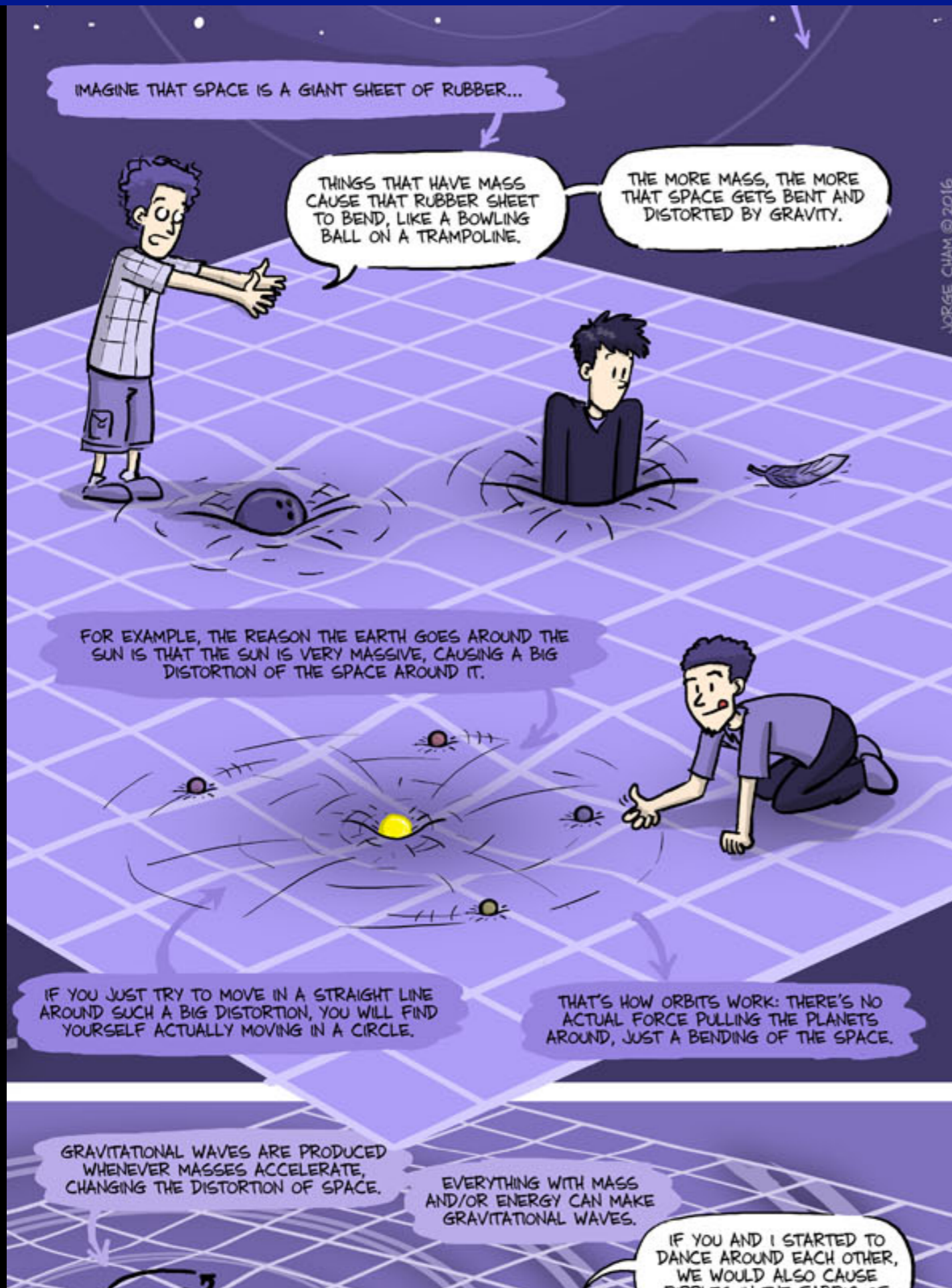
質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

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

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



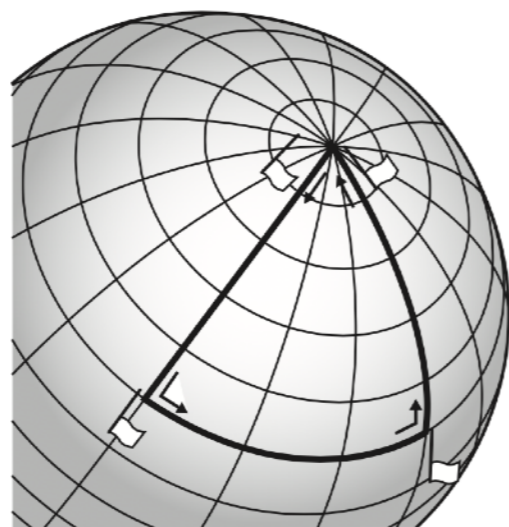
一般相対性理論



空間のゆがみが重力の原因だ

光や物体は、まっすぐ進んでいるつもりでも、曲がって進む

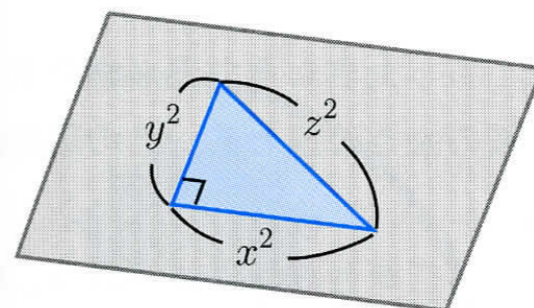
一般相対性理論 (1915年)



正の曲率 (地球表面)

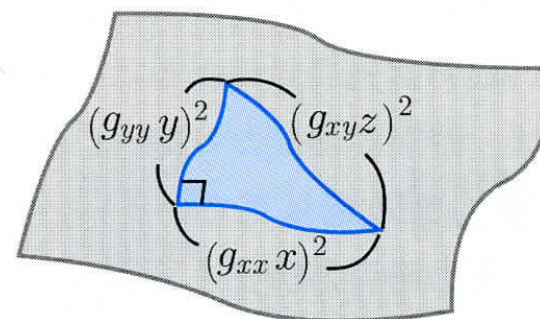
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



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

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



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

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

重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが重力の正体だ

重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915年)

重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

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

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

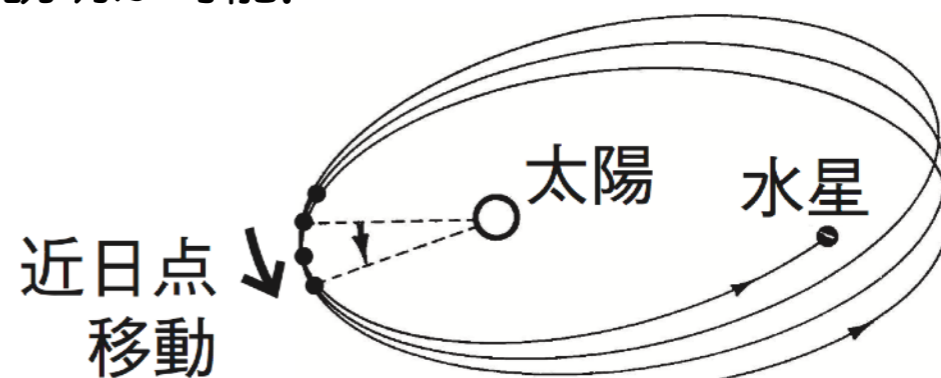
一般相対性理論が説明するもの



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???



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

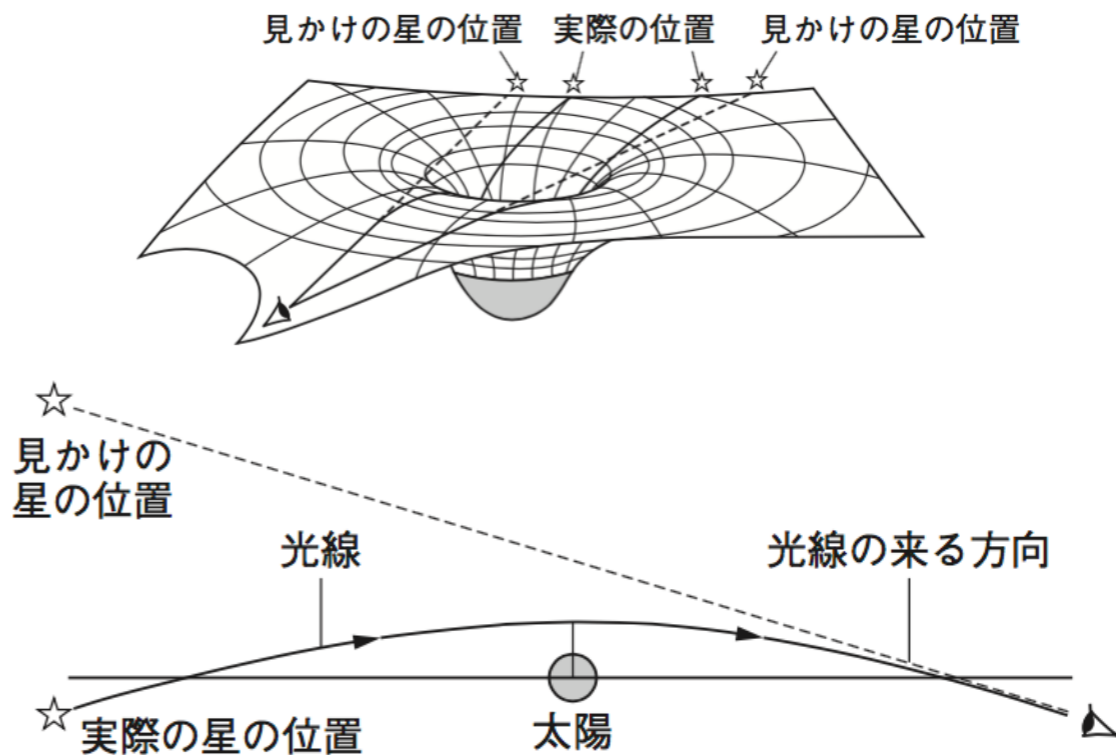
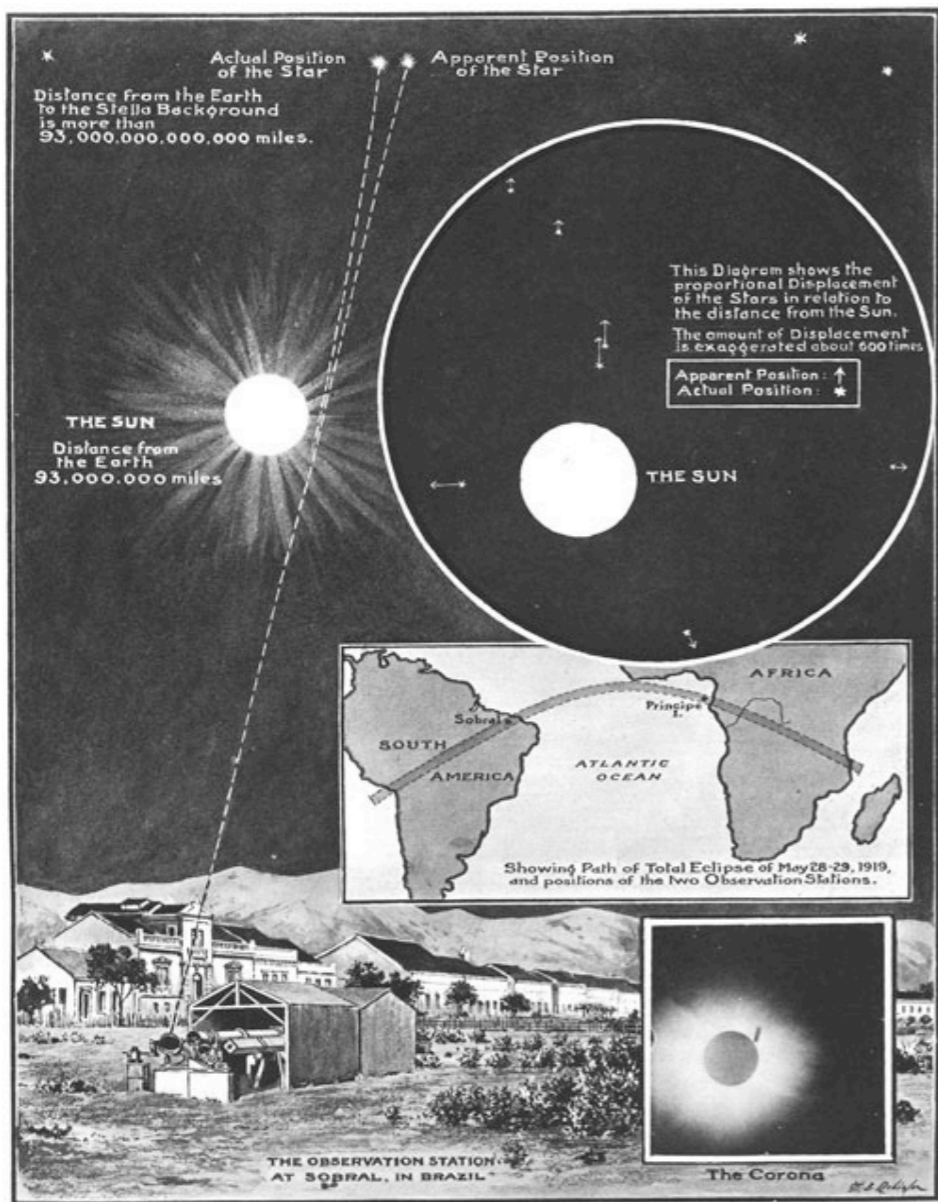
1915年, アインシュタインが, できたばかりの一般相対性理論を適用すると, 「43秒角の歳差運動」が出てきた。

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
- 重力によってゆがんだ空間では, 時間の進み方は遅くなる。
- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける。
- 宇宙全体は動的でなければならない。
- 重力波が宇宙空間を伝わる

一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

- 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる



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

重力レンズ効果として観測される▶



Galaxy Cluster Abell 2218

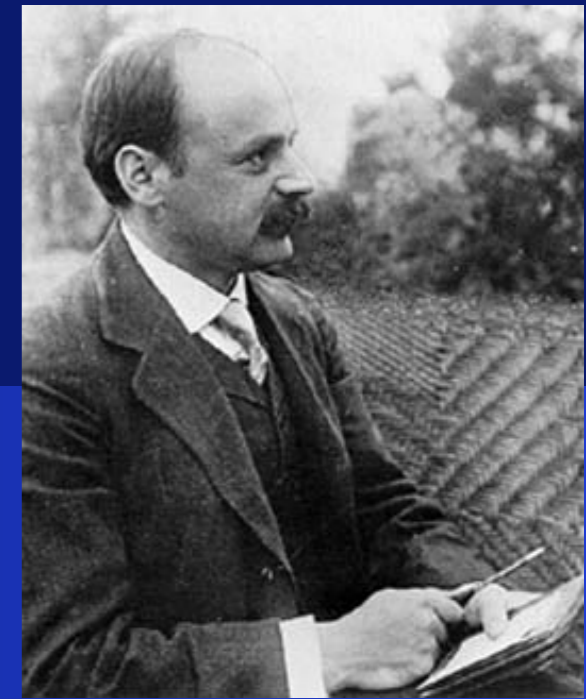
HST • WFPC2

ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. **ブラックホールが見つかるまで**
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. ブラックホールはどうできた？
星の進化シナリオ
4. ブラックホールの未解決問題
 - A. 銀河中心ブラックホールの形成
 - B. 時空特異点の問題
 - C. 重力波観測で見つかった正体不明天体
 - D. 相対性理論はどこまで正しい理論か

アインシュタイン方程式の解 【シュワルツシルド解】



Schwarzschild (1916)
球対称, 真空での方程式の厳密解

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

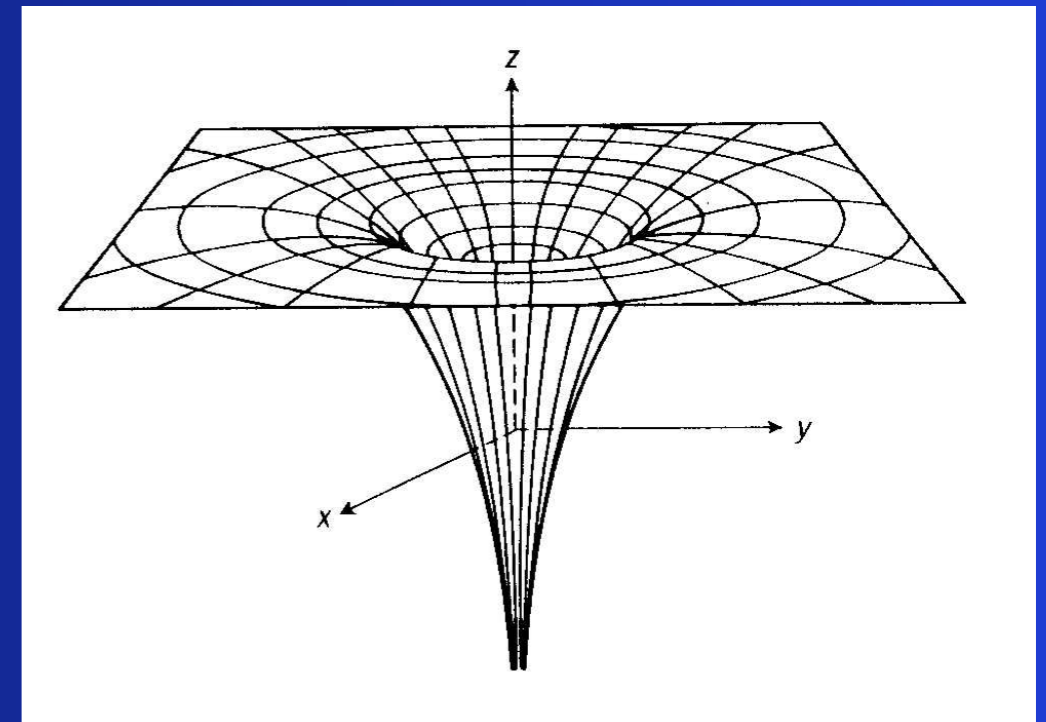
困ったことに, ……

$r=0$ で特異点

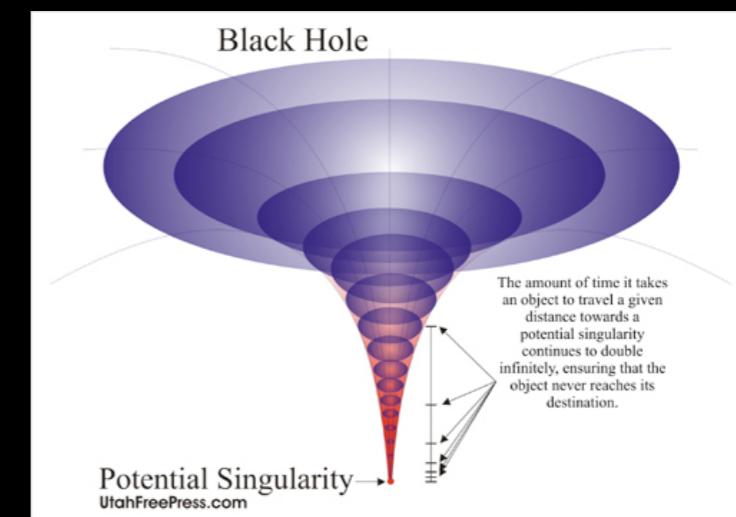
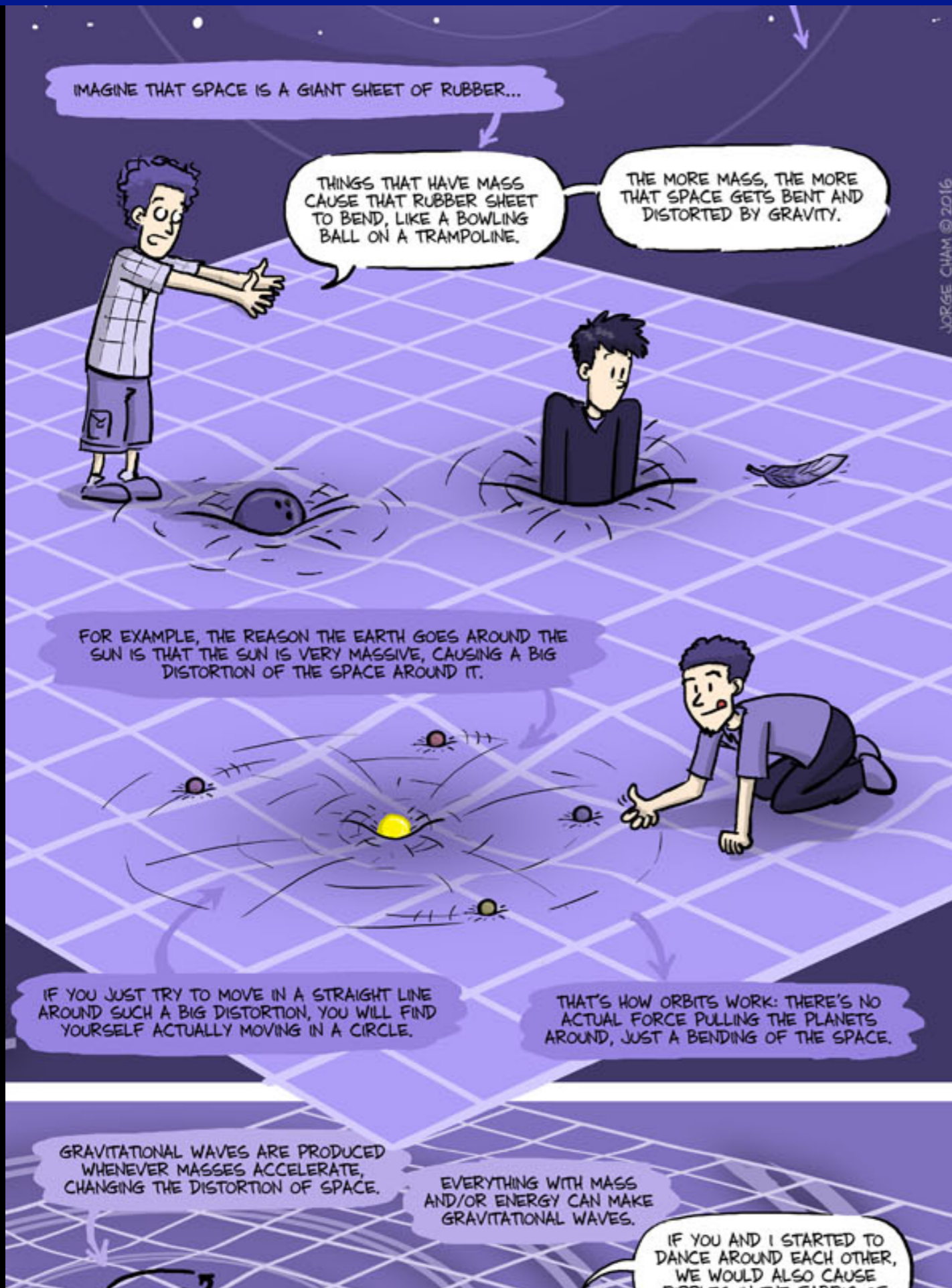
⇒ 今でも困ってる

$r=2GM/c^2$ でも特異点

⇒ ブラックホールの境界



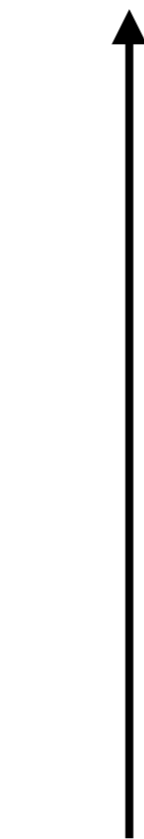
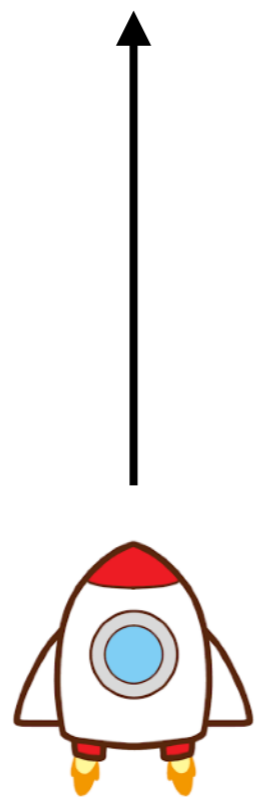
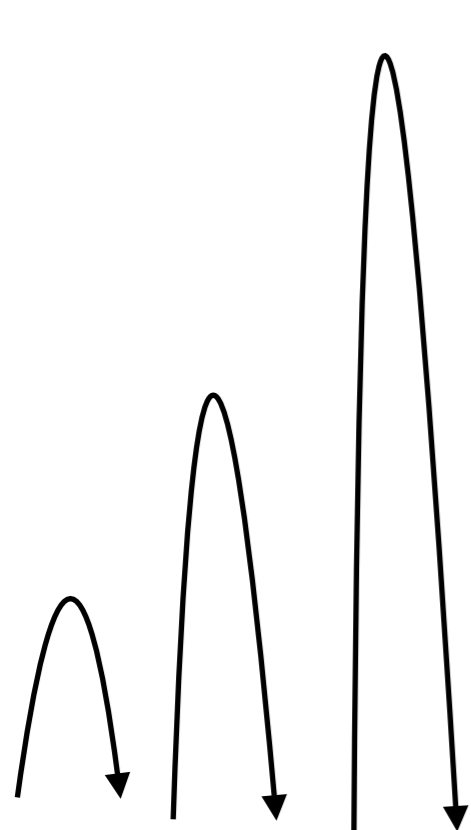
ブラックホール



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

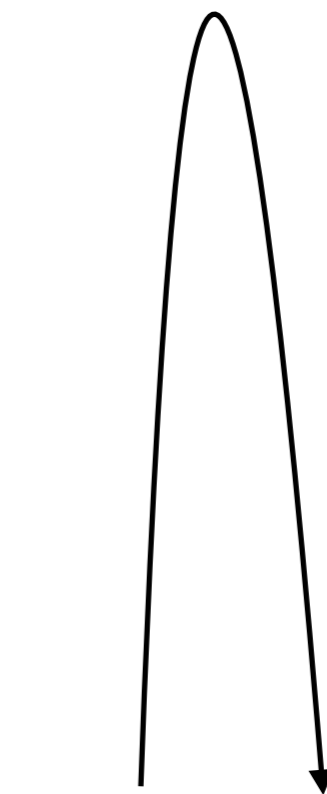
ボールを速く投げ上げると、
高くまで飛ぶ



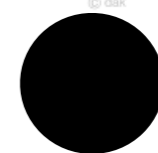
秒速
30万 km



光は当然
脱出できる



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**



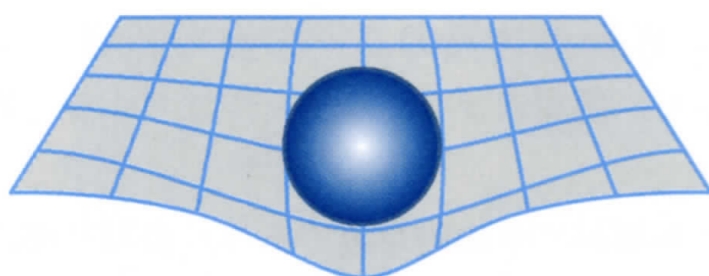
地球からの脱出速度
秒速 12 km

ブラックホール

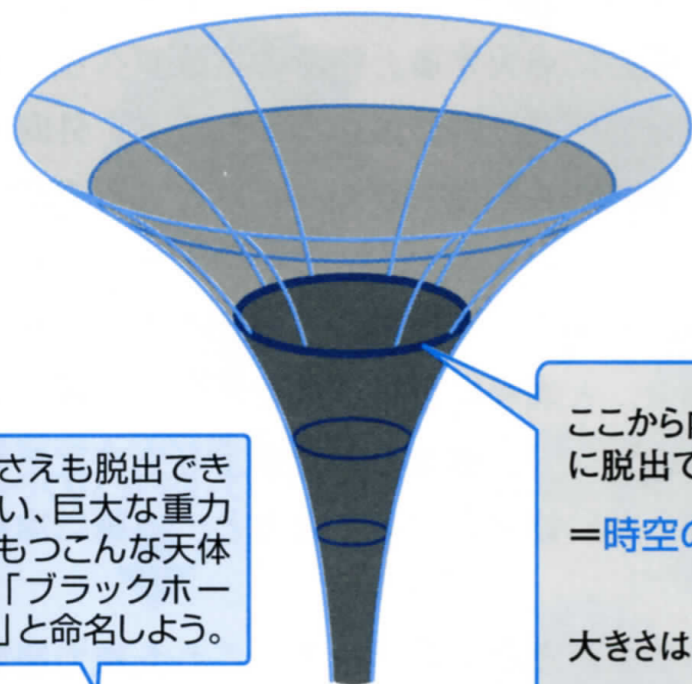
=重力が強すぎて、光さえも出られない天体

=因果的に隔離される領域

境界=地平面 (ホライズン)



重い物体の周りでは
時空がゆがむ。



非常に重い物体のまわりでは時空が大きくゆがんで、ブラックホールになる。

光さえも脱出できない、巨大な重力をもつこんな天体を「ブラックホール」と命名しよう。

ここから内側からは光さえも外向きに脱出できない。

=**時空の地平面** (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

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

(M :物体の質量, G :重力定数, c :光速)

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



ホイーラー

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

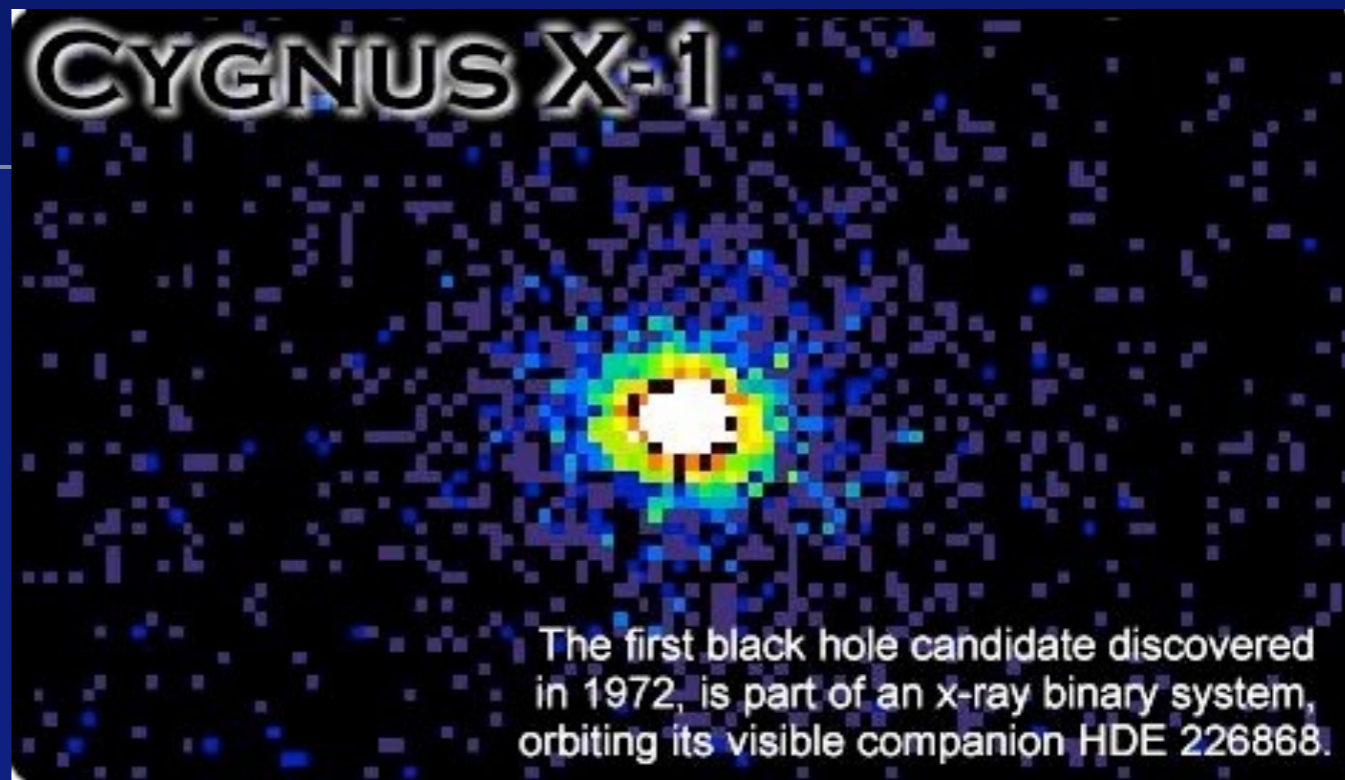
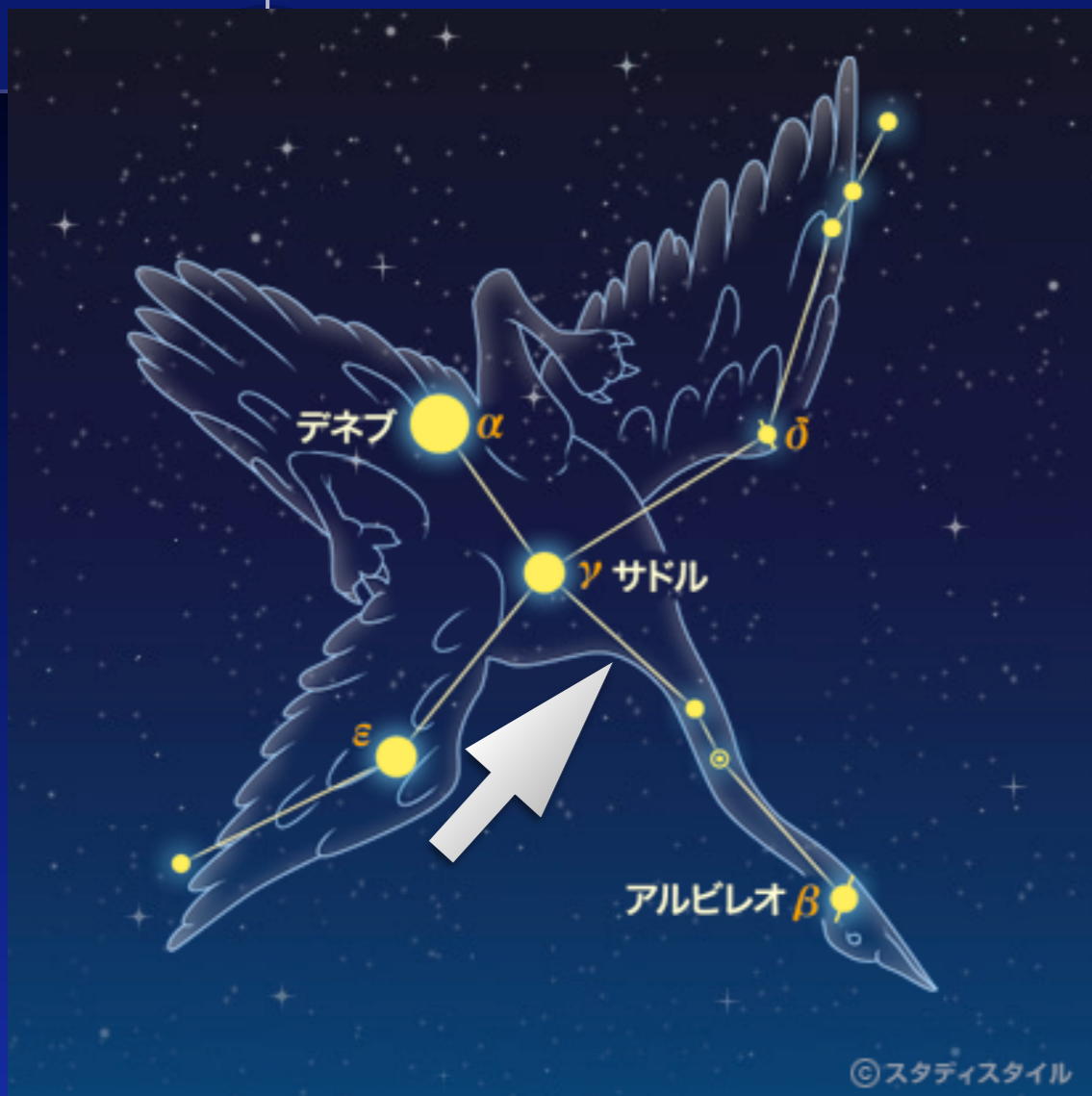
天体	M	R_{Sch}
地球	6.0×10^{24} kg	8.9 mm
太陽	$M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30}$ kg	2.95 km
Sgr A*	$4.2 \times 10^6 M_{\odot}$	1.24×10^7 km

Newton力学でも偶然同じ値が出てくる

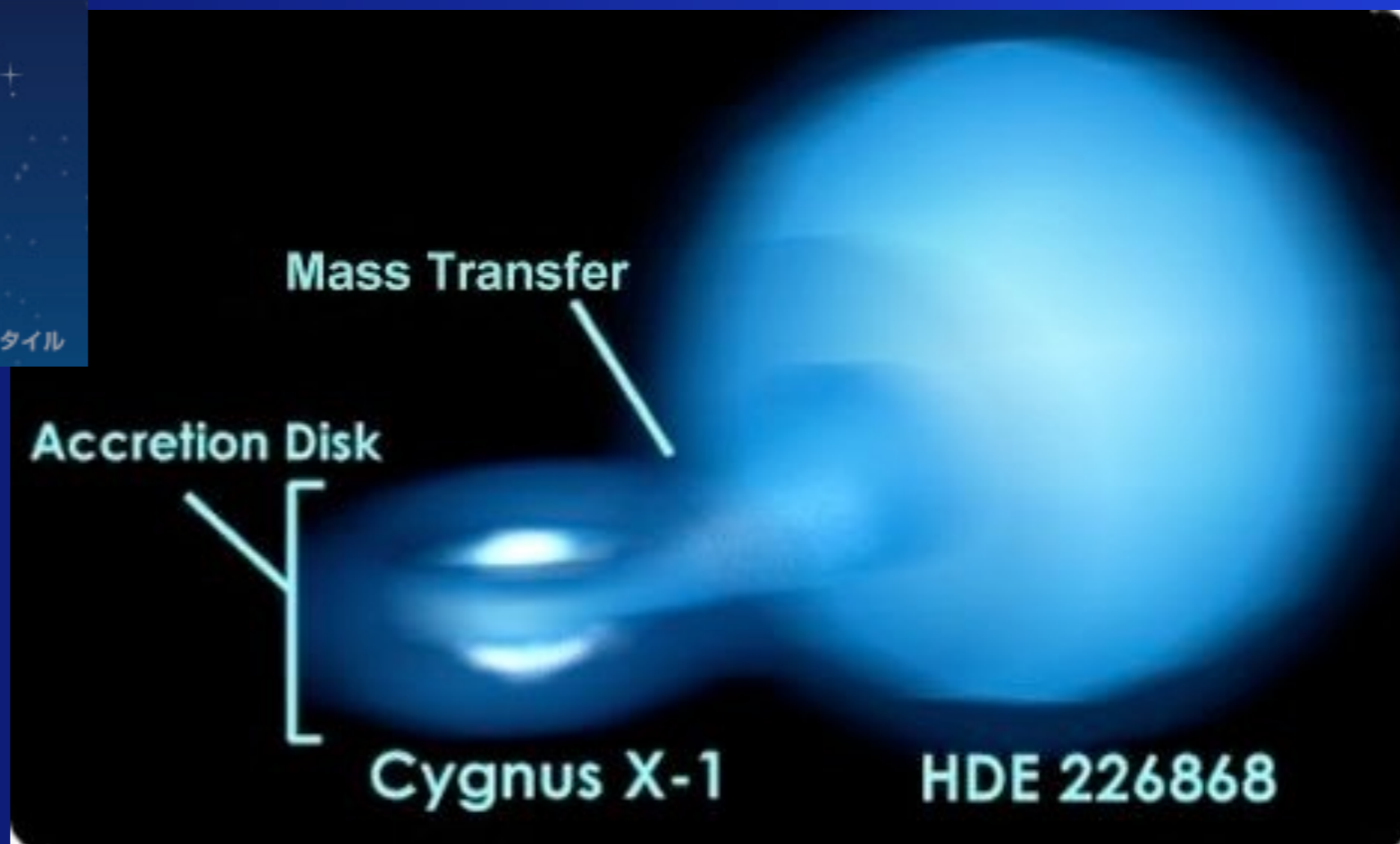
$$-\frac{GMm}{R} + \frac{1}{2}mc^2 = -\frac{GMm}{\infty} + \frac{1}{2}mv^2 > 0$$

$$R < \frac{2GM}{c^2}$$

はくちょう座 X-1はブラックホール



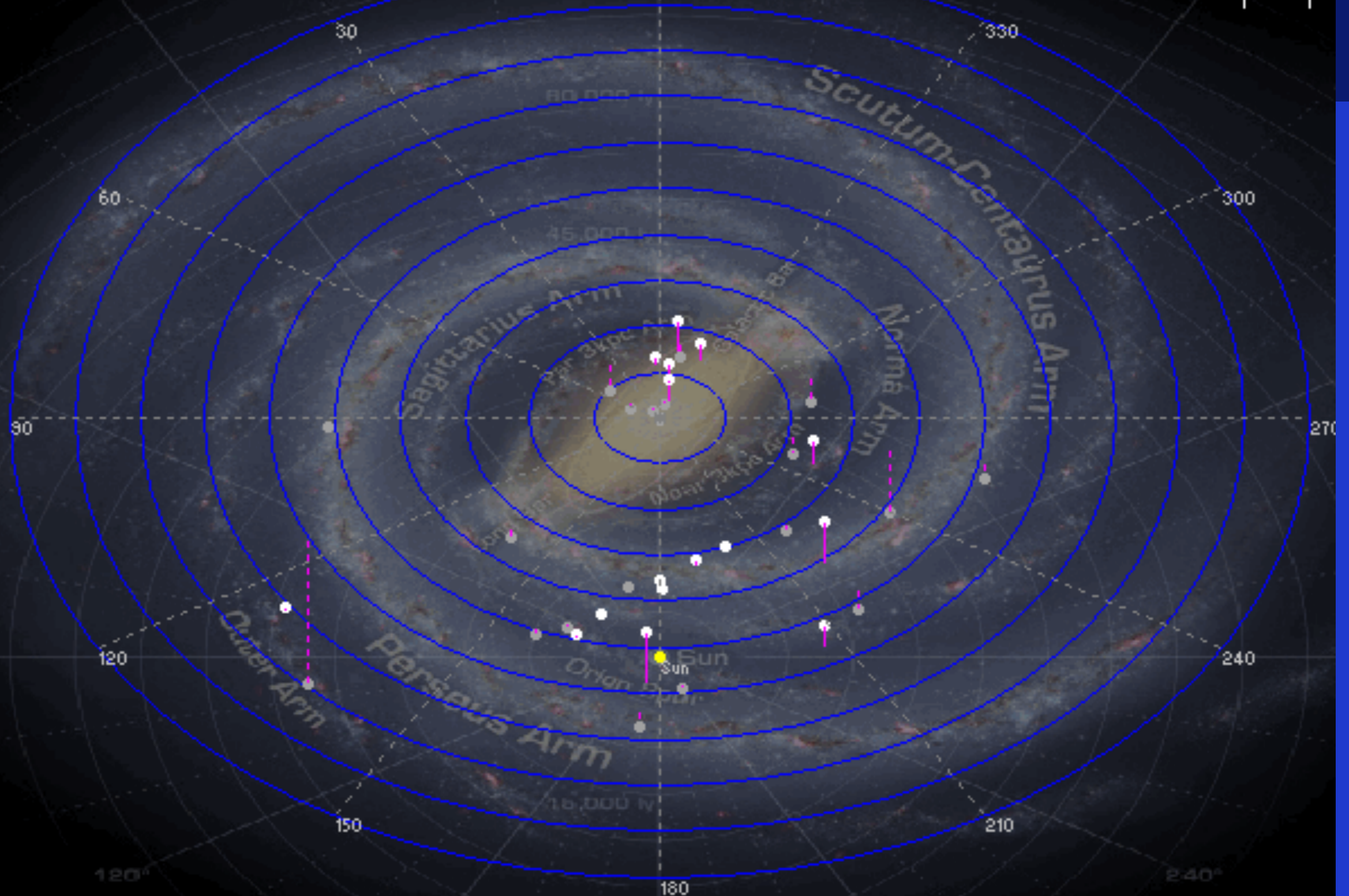
6000光年先



The 37 black hole candidates within 50,000 LY of the galactic centre

5,000 LY

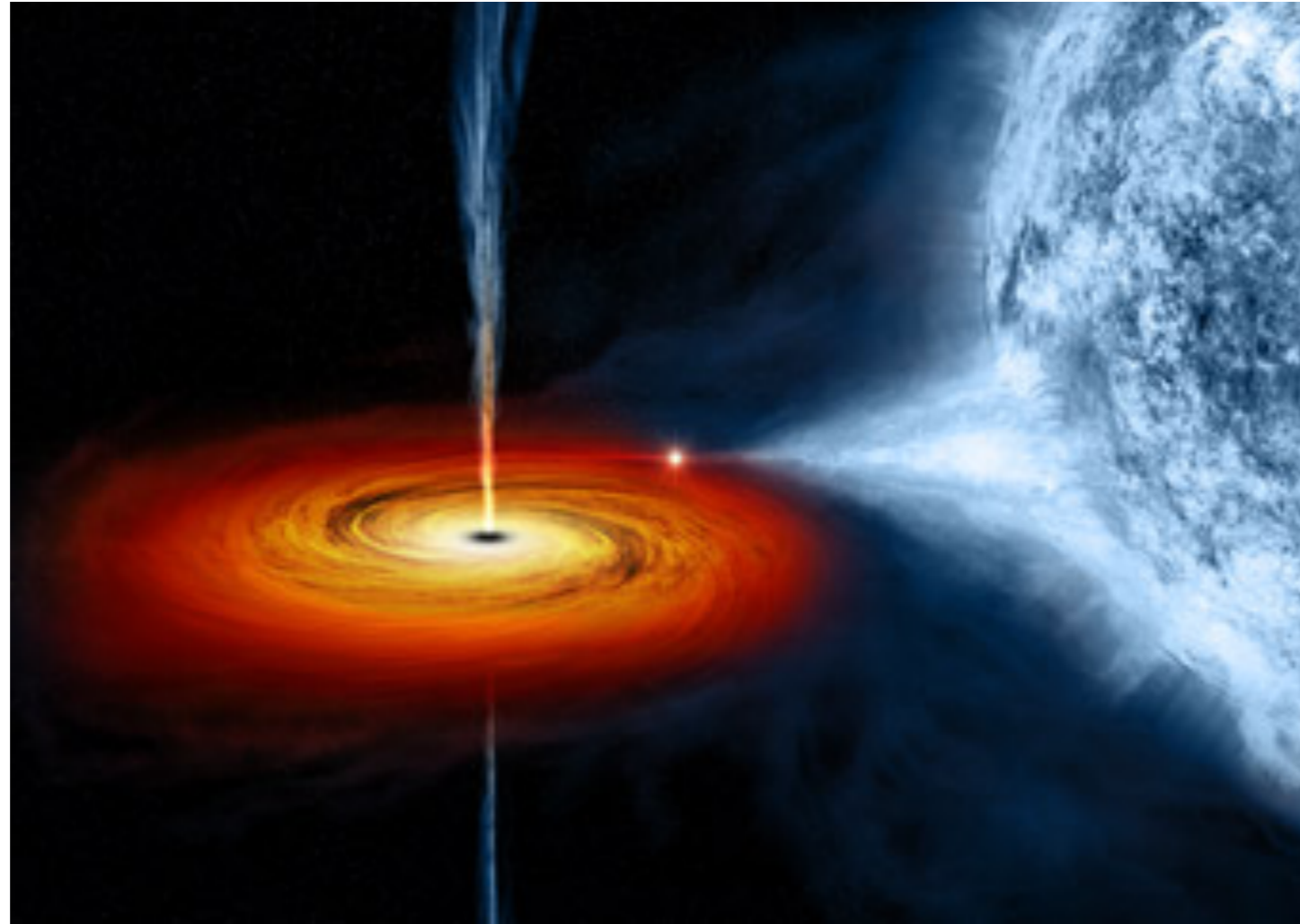
Galactic centric (galactic longitude and latitude)



3D Diagram by Larry McNish © 2012, All Rights Reserved

ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？

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

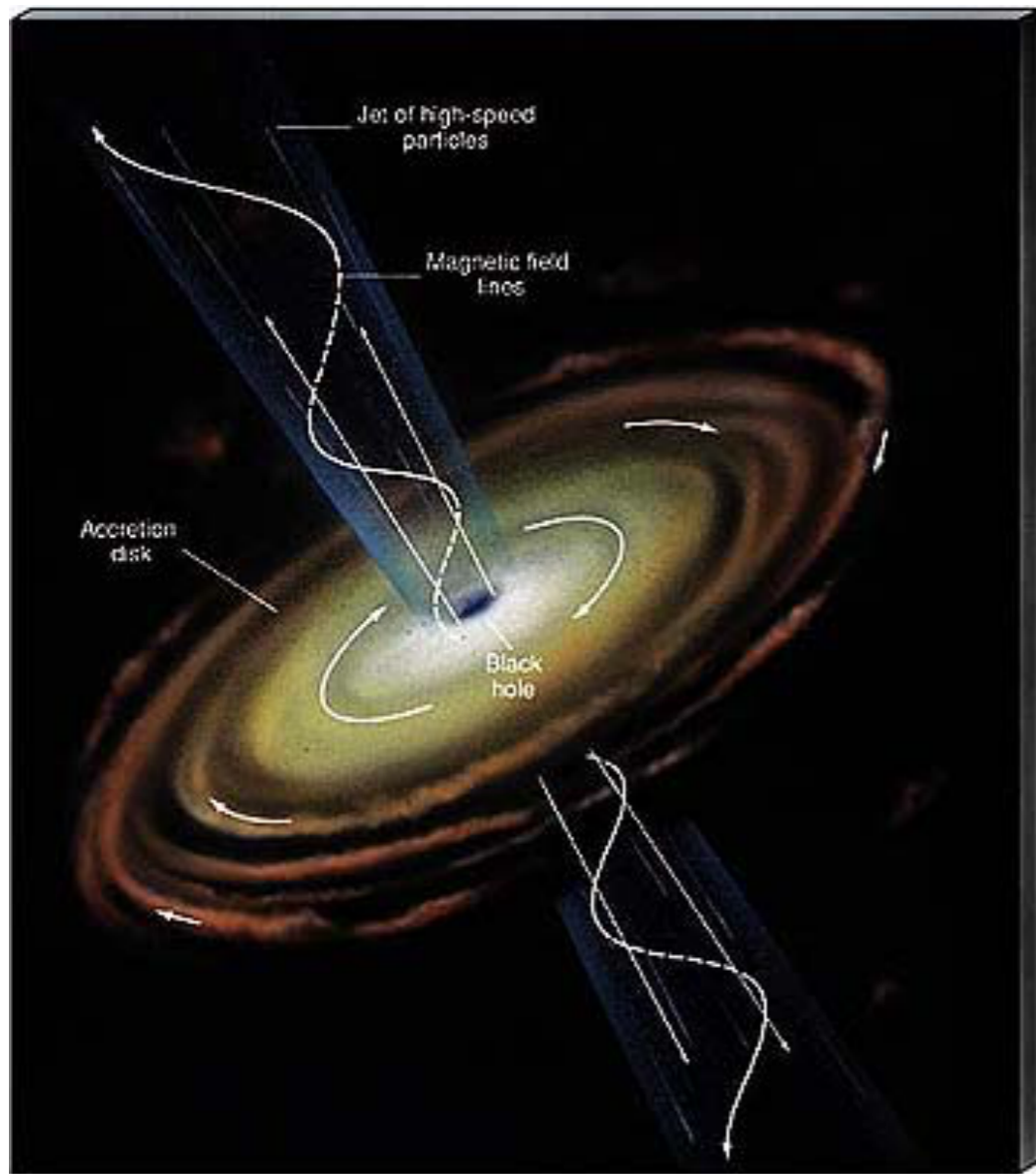


想像図

<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/black-hole-spews-atoms/>

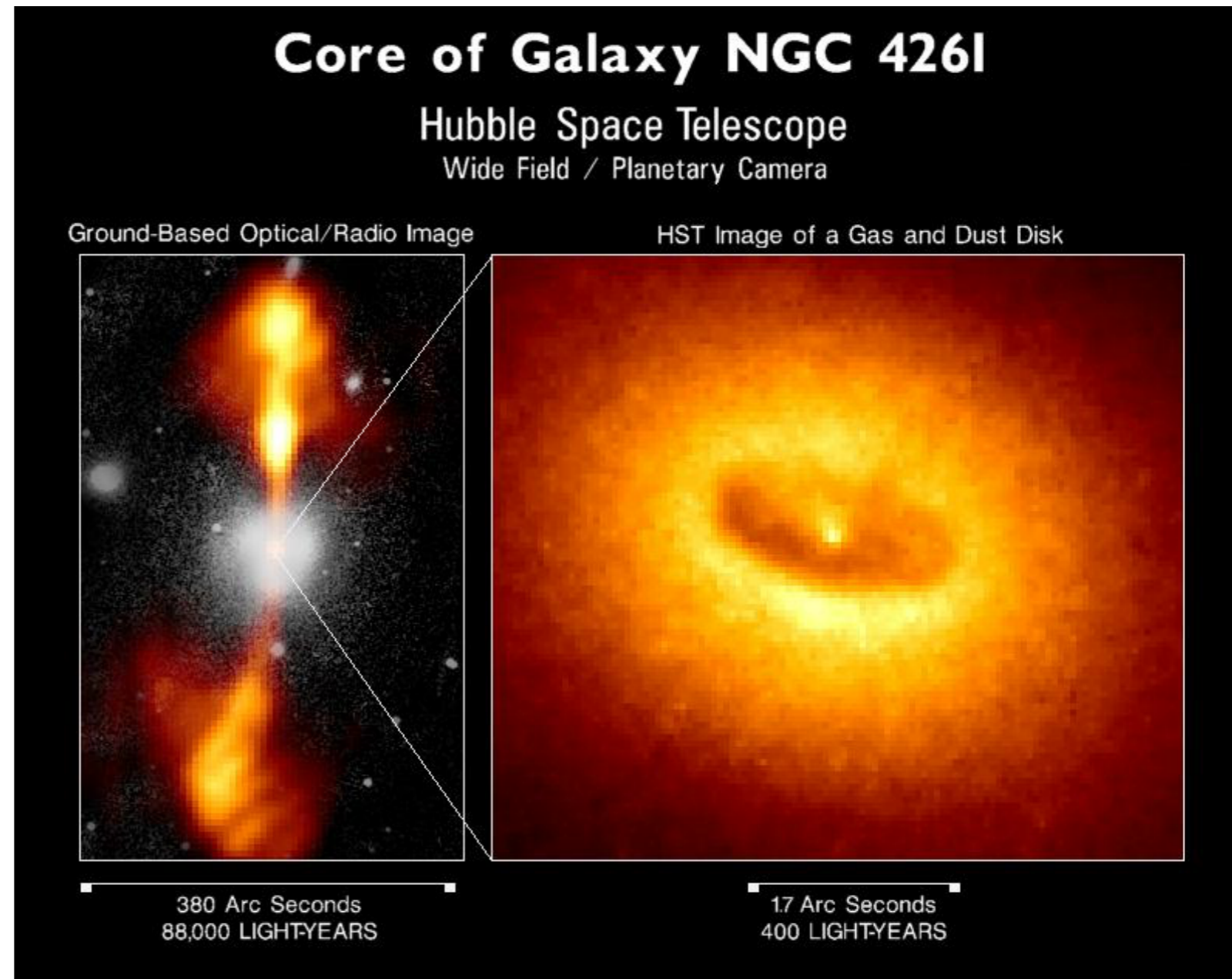
すべてのガスが吸い込まれるわけではない
軸方向にジェットが吹き出す

ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？



<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)

2020年のノーベル物理学賞 受賞者

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

“ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大

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

ラインハルト・ゲンツェル (68) 独マックスプランク研究所

アンドレア・ゲズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



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

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



解説

2020年のノーベル物理学賞

～脚注の多い解説～

真貝寿明（大阪工業大学）

1. 今年も宇宙分野、に驚く

ノーベル物理学賞は、このところしばらくは、宇宙・素粒子分野と物性物理分野を毎年交互に授賞対象としていた。昨年の物理学賞は、宇宙論の理論を開拓したピーブルズ¹と太陽系外惑星を初めて発見したマイヨールとケローだった²。そのため、私を含め多くの方は、今年は宇宙以外の分野に贈賞されるものと想定していた。ところが、10月6日夕方に発表された今年の受賞者は、ブラックホール研究でまとめられた3氏だった。嬉しい誤算である。本稿では、受賞者の業績³を含め、最近のブラックホール研究について紹介したい。教育者向けの余談を盛り込んだところ、脚注の多い解説になってしまったことを先にお断りしておく。

今年の受賞者は、英オックスフォード大のロジャー・ペンローズ (Roger Penrose, 89)、独マックスプランク研究所のラインハルト・ゲンツェル (Reinhard Genzel, 68)、米カリフォルニア大ロサンゼルス校のアンドレア・ゲズ (Andrea Ghez, 55) の3氏である。贈賞理由は、ペンローズは「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⁴、ゲンツェルとゲズは「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⁵」となっている。ペンローズは「特異点定理」をはじめとして一般相対性理論分野を中心に世界をリードしてきた理論物理学者・数学者であり、ゲンツェルとゲズはそれぞれ独立に私たちのいる天の川銀河の中心を観測して、超大質量ブラックホールが存在していることを示した天文学者である。



図1 左からペンローズ、ゲンツェル、ゲズの似顔絵。ノーベル財団が受賞者発表に用いたもの。

¹ P.J.E. Peebles (1935～)。よく「ピーブルス」と発音され、表記されているが、「ピーブルズ」と表記するのが正しいそうだ。(2020年9月の日本物理学会での須藤靖氏の講演から)

² ノーベル賞は各部門での受賞者が毎年3名までと定められている。昨年の3名の組み合わせはやや強引に感じた。今年も当初はそう感じさせる3名であったが、ノーベルの遺言にある「物理学の分野で最も重要な発見または発明をした人物」という点については誰も異論を唱えないだろう。

³ 受賞者の業績など、ノーベル財団の発表した資料は、Web ページ (英語) から取得できる。
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>

⁴ 原文は「for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity」。robust という単語は、辞書では「強靱な、頑丈な」と出てくるが、研究分野では「多少のゆらぎは問題とならない」という意味で使われる。ここでは、ブラックホール形成が特殊なものではなく一般的に発生する、という意味になるので、「自然な帰結」と訳した。ペンローズの業績がこのタイトルの通り「発見」と言えるかどうかは、本稿読後の皆様の判断に任せたい。

⁵ 原文は「for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy」

論座 R O N Z A

16636 本の記事が読み

論座とは? | よくある質問 | お問い合わせ

- 政治・国際
- 経済・雇用
- 社会・スポーツ
- 科学・環境
- 文化・エン

論座 > 科学・環境 > 記事一覧 > 記事

科学・環境

「ブラックホール」でまとめたノーベル物理学賞

理論家ペンローズの並外れた業績と、「謎」を「実在」に転換させた長年の天文観測

真貝寿明 大阪工業大学教授 (相対性理論、宇宙物理学、天文学史)

ノーベル賞 | ブラックホール | 基礎科学 | 宇宙

2020年10月13日

- ツイート
- おすすめ 221
- シェア
- B! 0
- noteで書く
- コメント 0件
- 印刷

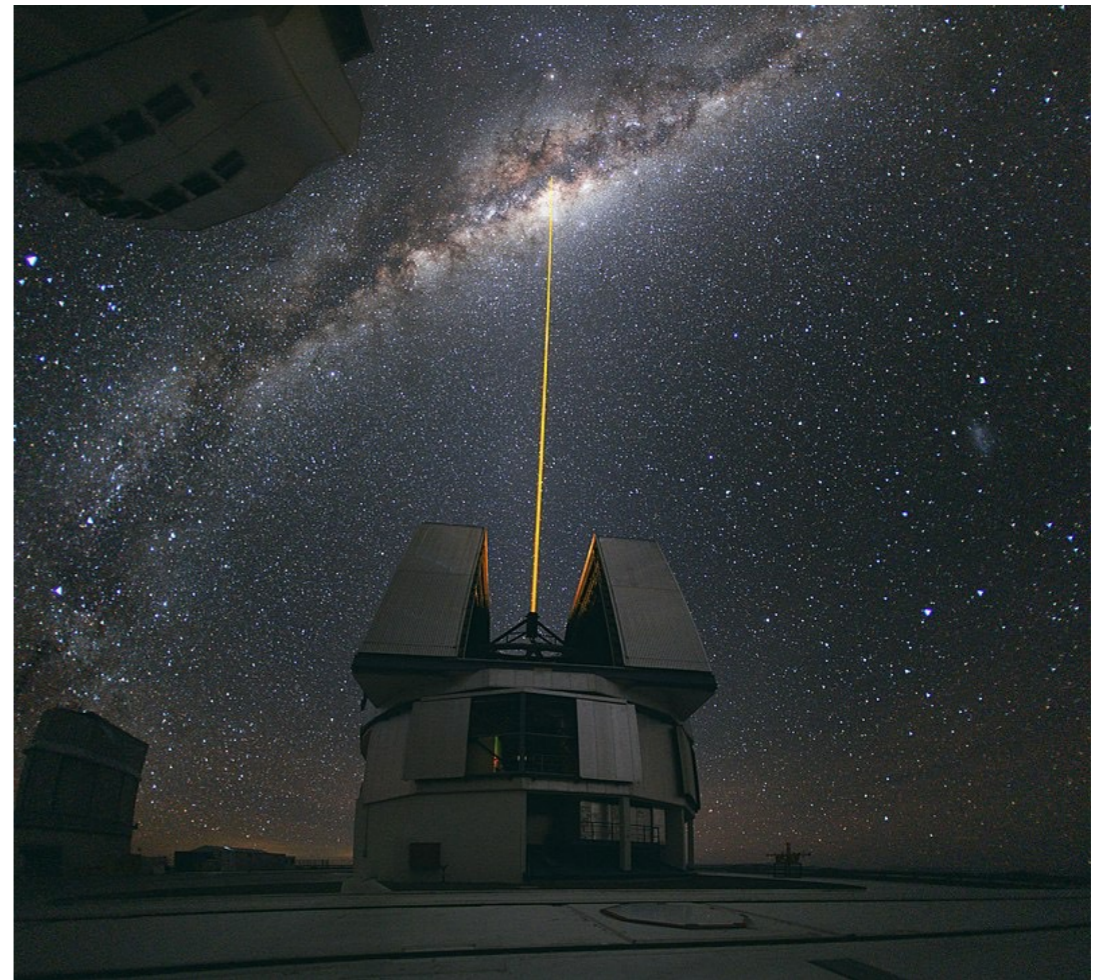
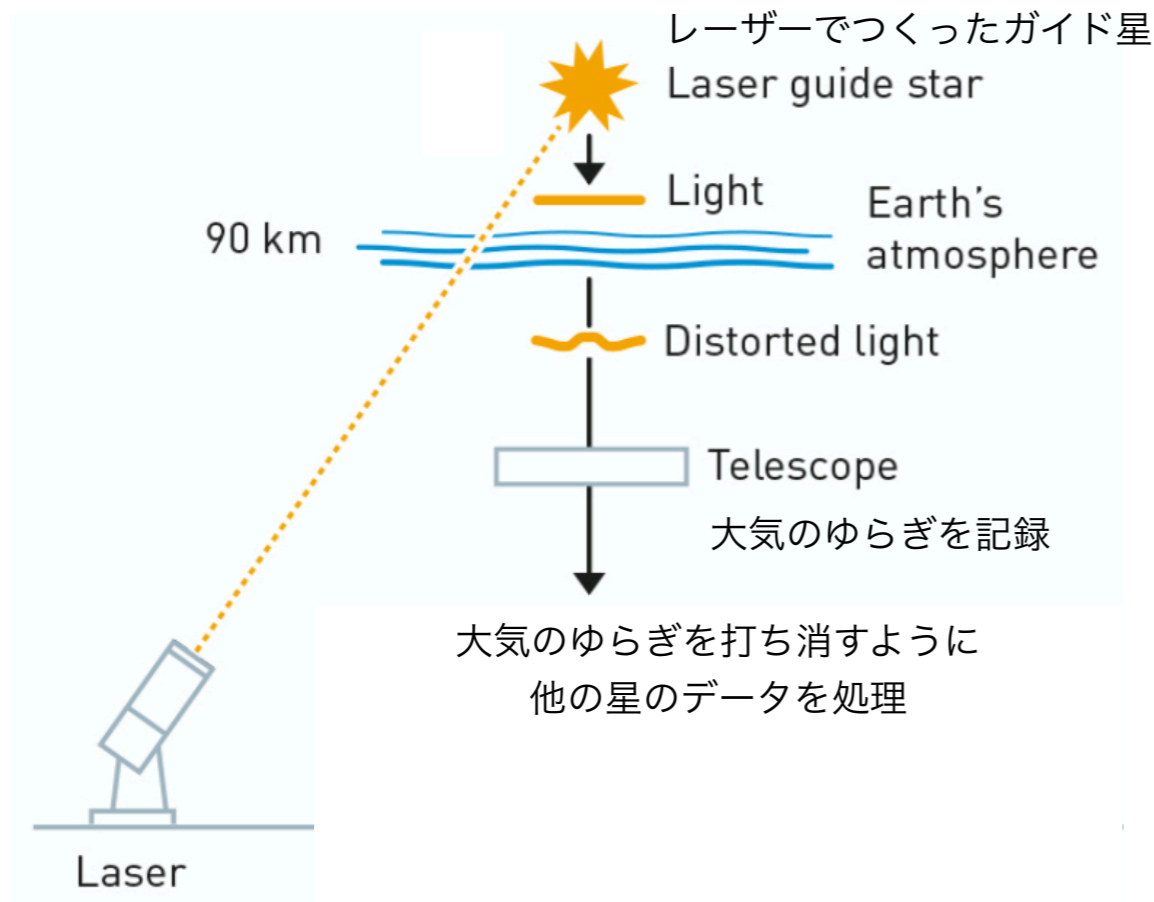


イラストはNASA提供

ラインハルト・ゲンツェル

アンドレア・ゲズ

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



<https://ja.wikipedia.org/wiki/ヨーロッパ南天天文台>



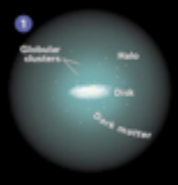
補償光学

<https://www.quantamagazine.org/>

THE MILKY WAY

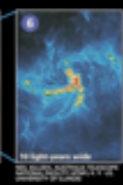
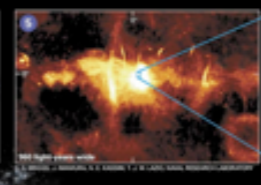
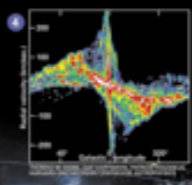
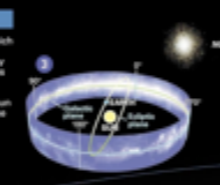
NATIONAL GEOGRAPHIC

Home galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or expel their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may lie a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



GUIDE TO THE GALAXY

- 1 Far beyond the galactic disk, yet drawn by its gravity, some stars and globular clusters orbit the galaxy's core. Regions of dark matter—invisible but felt through its gravitational effects—extend beyond that.
- 2 Most clouds of interstellar dust block much of our night sky view of the Milky Way, which from our position in the flat galactic disk appears as a fuzzy band of light. Infrared cameras can see through the dust to reveal the galaxy's structure.
- 3 Even a orbit around the sun looks at a skewed angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

- 1 A graph based on a radio survey reveals the rotational motion of molecular gas in the inner part of our galaxy, gas moving away from Earth (top half) and toward Earth (bottom half). The densest gas appears white; least dense, blue.
- 2 Massive amounts of energy are released near the center of the Milky Way, producing electrons that race along magnetic field lines, illuminating remnants of stellar explosions.
- 3 Probing even deeper into the core, a radio image detects a spiral of hot gas that is falling toward what may be a black hole some 2.6 million times as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way... incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulas.

- Globular star cluster
- Interstellar gas and dust
- Nebulae
- Younger star region (OB stars)
- Molecular cloud
- Galactic bulge or center (older star region)

PLANETARY NEBULA NGC 604



Exotic laboratories of the Milky Way... Just as our sun will die in its death throes some five billion years from now, a dying star expanded into a red giant and was transformed into the nebula NGC 604 (above). At its center shines a small, hot core, which will cool and fade over eons to come, its stellar wind, streams of charged particles, rushes outward in opposite directions, the exhaust from back-to-back jet engines. This bipolarity, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulas. The wispy light from the star heats NGC 604's gases and makes them glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark nebulae that block our view of stars beyond. When a star sheds a rich nebula, the dust particles reflect starlight and the black

galaxy, including dark nebulae that block our view of stars beyond. When a star sheds a rich nebula, the dust particles reflect starlight and the black... A star 25 times as massive as the sun and 100,000 times brighter, it sports a disk of circumstellar dust, shown here in false color, about 26,000 times wider than Earth's... Light from the hot star is absorbed by and re-emits the dust, making it glow... In that location, the star's intense radiation causes the fast-expanding Crab Nebula (left), a supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—whirling 30 times a second.

reliness, however, every star in the cluster is about the same age, billions of years older than our 4.5-billion-year-old sun. Between dust clouds toward the center of the Milky Way, the Hubble Space Telescope focused on a rare clear region in the Sagittarius star cloud (above right). These Sagittarius stars formed at different times, most are older than the sun. They sparkle like an assortment of gems on a jeweler's velvet pad. In some dark clouds look orange... A star 25 times as massive as the sun and 100,000 times brighter, it sports a disk of circumstellar dust, shown here in false color, about 26,000 times wider than Earth's... Light from the hot star is absorbed by and re-emits the dust, making it glow... In that location, the star's intense radiation causes the fast-expanding Crab Nebula (left), a supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—whirling 30 times a second.

visible light from the Hubble Space Telescope... Dust of interstellar dust looks brown over large regions along the central plane of the Milky Way, but not thick and smooth but seems as frilly as the head of a glass of beer. Bubbles of shock waves and stellar wind from... In that location, the star's intense radiation causes the fast-expanding Crab Nebula (left), a supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—whirling 30 times a second.

invoking stars may have shaped this surprising pattern. When a massive star comes to the end of its nuclear fuel supply, it collapses and then rebounds in a brief, powerful explosion, or supernova. The Chinese called these celestial fireworks... In that location, the star's intense radiation causes the fast-expanding Crab Nebula (left), a supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—whirling 30 times a second.

Each clumpy, filamentary... Glomming along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are being born. The Lagoon Nebula and other... In that location, the star's intense radiation causes the fast-expanding Crab Nebula (left), a supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—whirling 30 times a second.

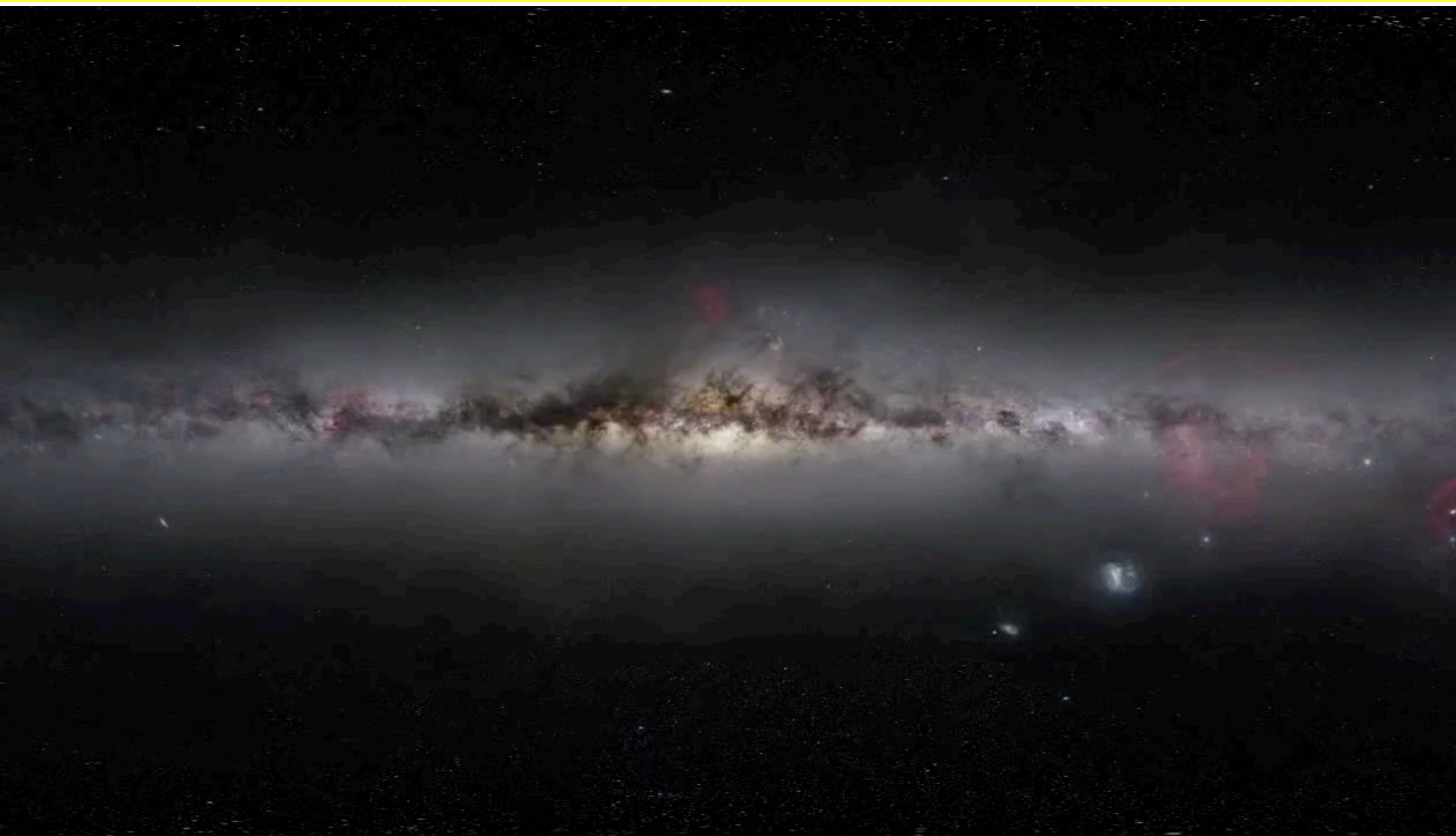
Each, clumpy, filamentary... Glomming along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are being born. The Lagoon Nebula and other... In that location, the star's intense radiation causes the fast-expanding Crab Nebula (left), a supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—whirling 30 times a second.

With new tools, astronomers are unravelling the nature of the Milky Way and measuring distances to stars and nebulae with greater accuracy. Still, they ask, How did the Milky Way form in the first place? How and when did the arms form? How many more galaxies circle nearby stars besides the 100 already discovered? And the biggest question of all: Do any of them harbor life?

Copyright © 2002 National Geographic Society, Washington, D.C. Reprinted August 2005.

For information regarding available maps call 1-800-852-1543 or write to National Geographic Maps, P.O. Box 4357, Evergreen, CO 80437-4357. You can find us on the Internet at nationalgeographic.com/maps.

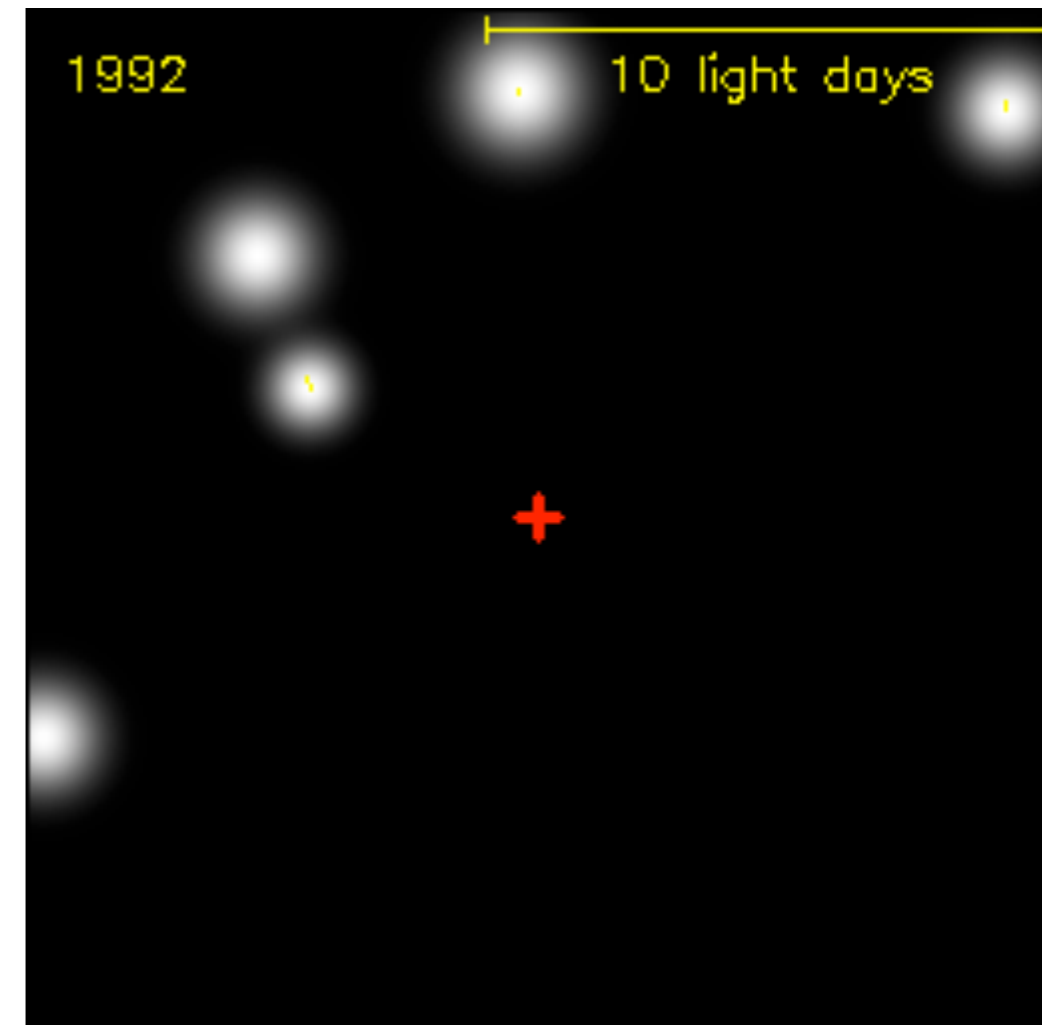
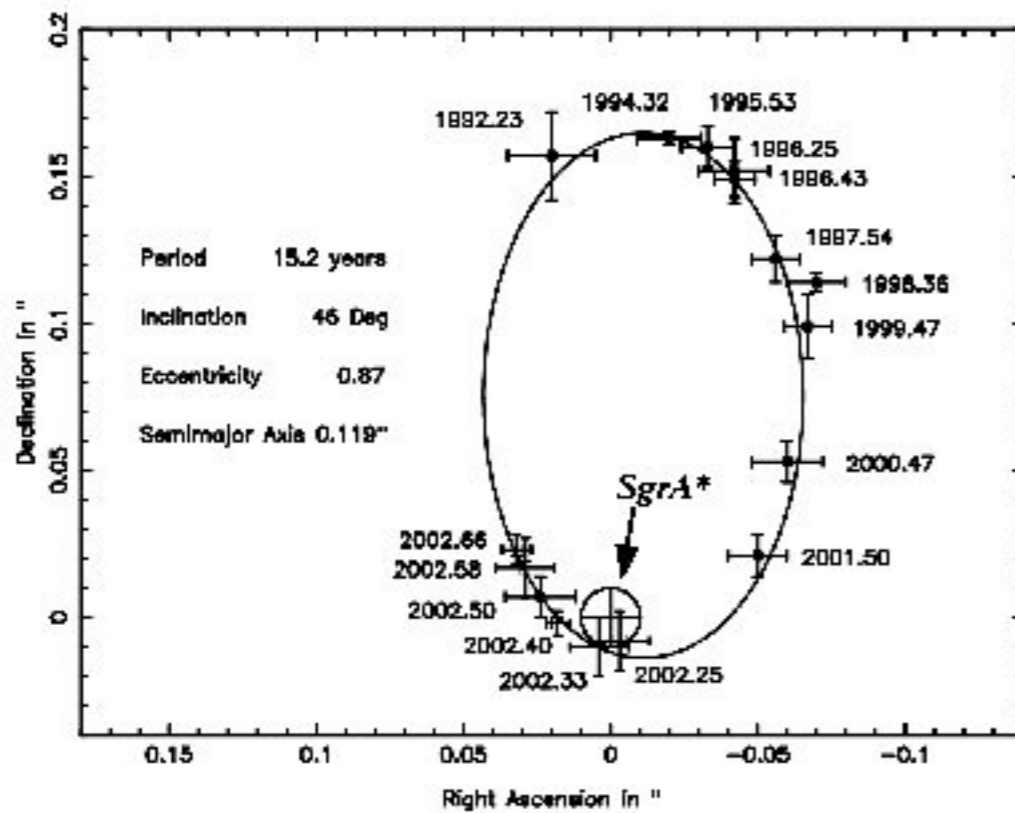
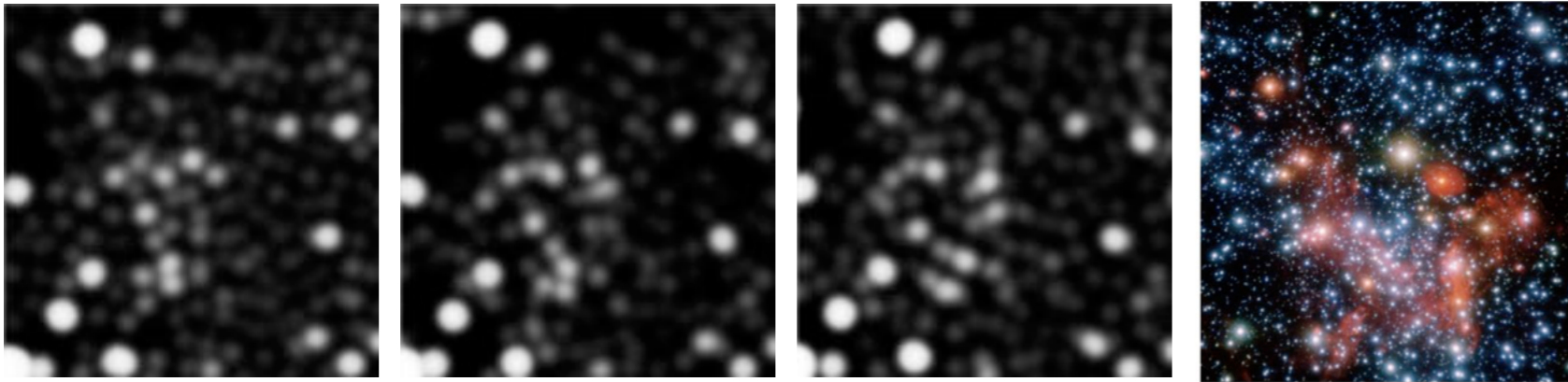
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

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

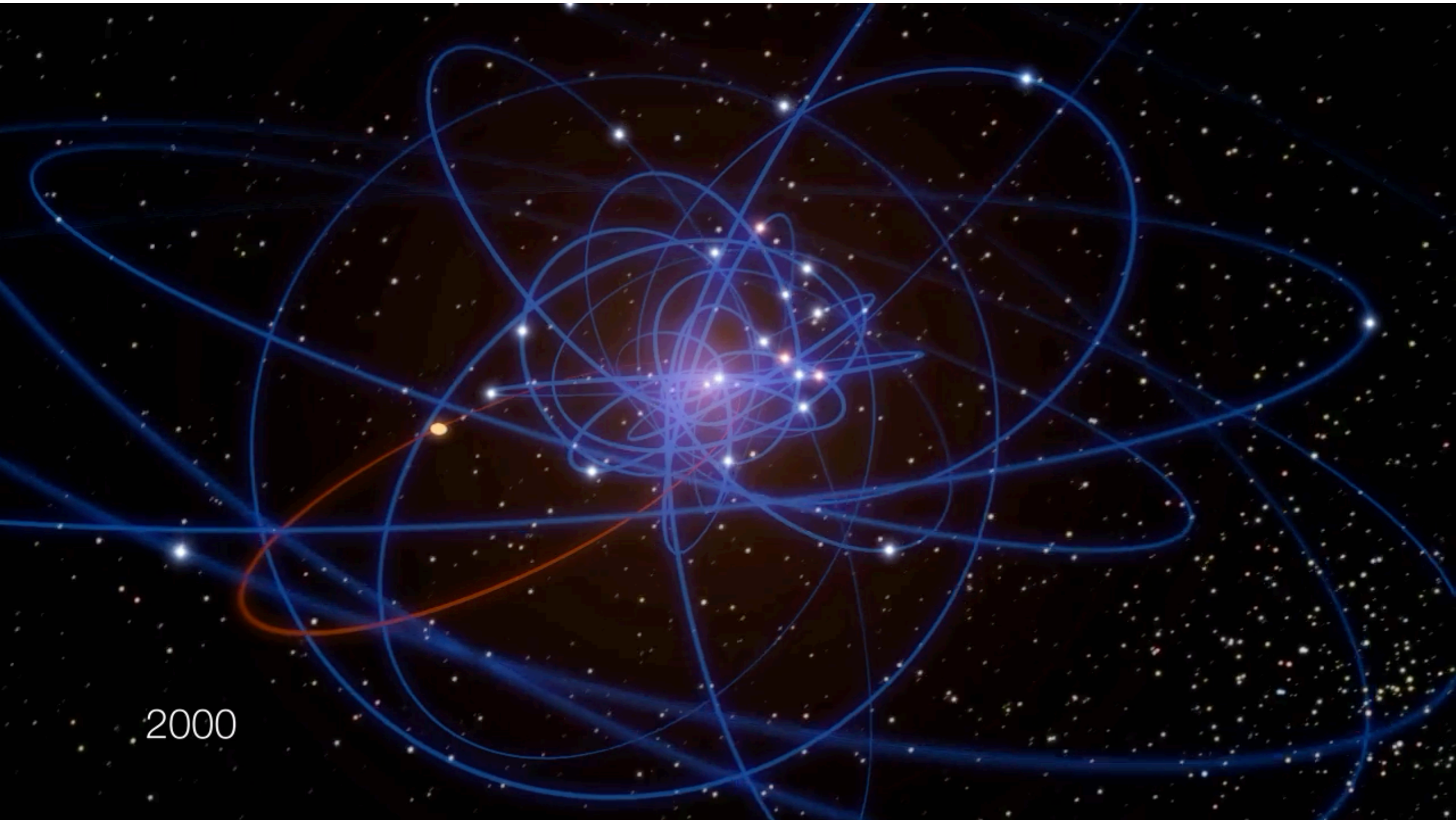
S2 orbit around Sgr A*



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

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

天の川銀河 中心付近の星の動き (アニメーション)



Reinhard Genzel and Andrea Ghez independently tracked the activity around the supermassive black hole at the Milky Way's center over a period of decades.

<https://www.quantamagazine.org/physics-nobel-awarded-for-black-hole-breakthroughs-20201006>

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



地球から5500万光年

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

電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い, 分解能高い

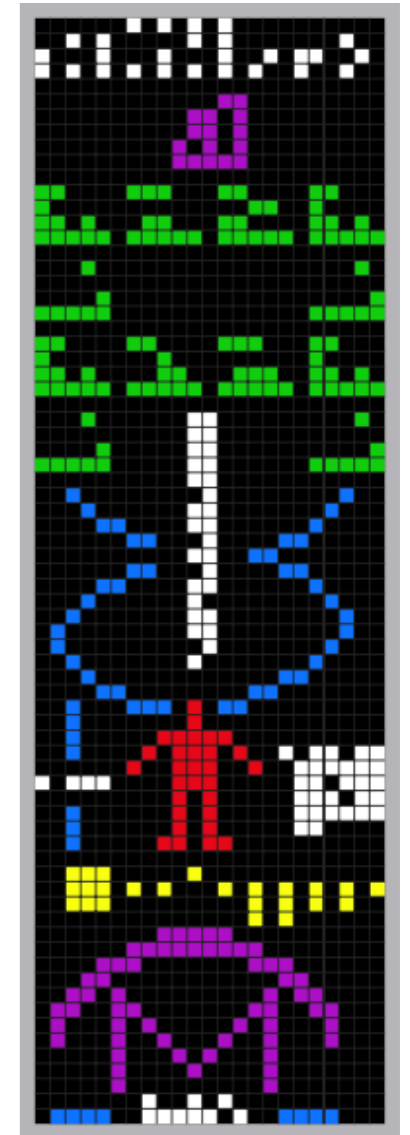


$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

野辺山45m望遠鏡

アレシボ電波望遠鏡 305メートル球面電波望遠鏡 (1963-2020)

(Arecibo Observatory, プエルトリコ)



- 1964 水星の自転周期55日の発見
- 1968 かにパルサー中心に中性子星発見
- 1974 連星中性子星発見
- 1989 小惑星カスターリア直接観測
- 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-)

アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

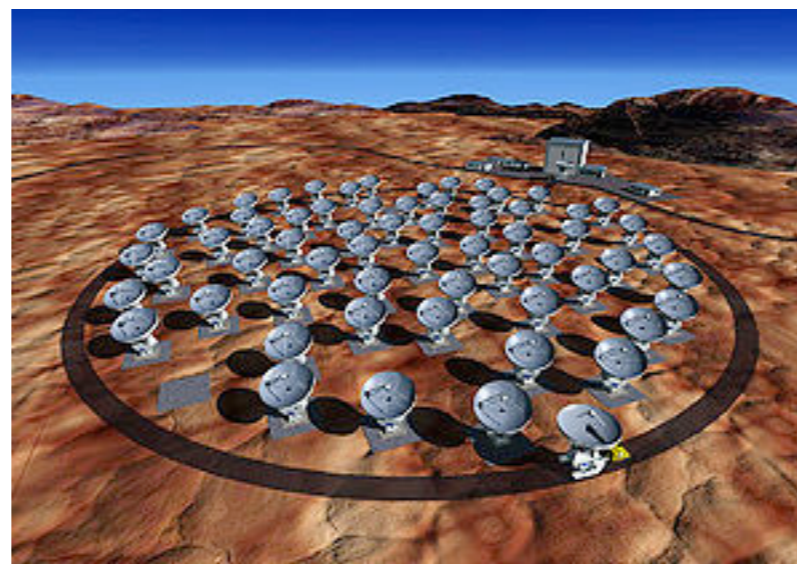
日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

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

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



「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」



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)



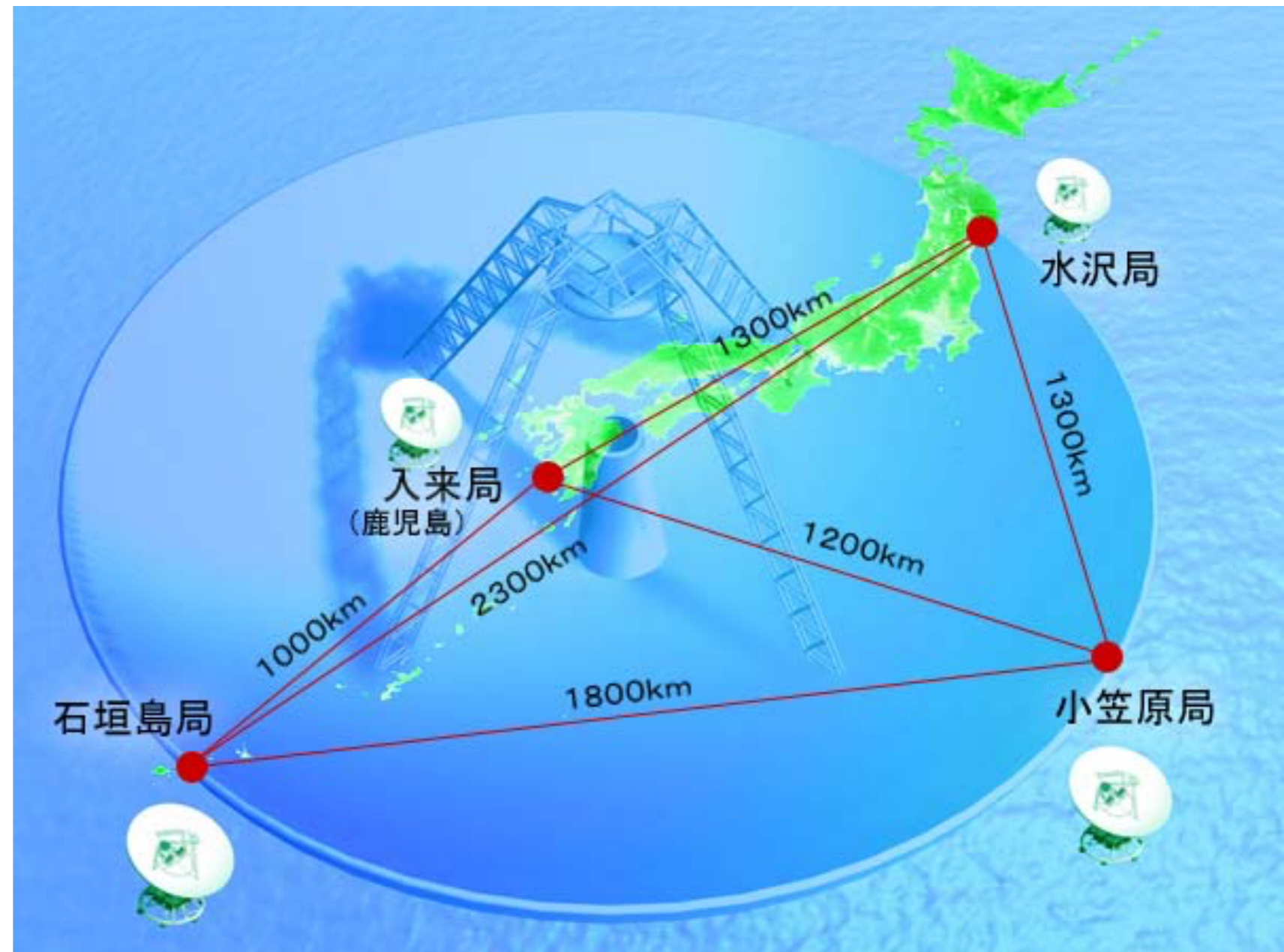
中国南西部の貴州省, 185億円, 天頂から40度の範囲を観測可能,
1万人強制移住, 半径5 km以内携帯電話禁止

http://japanese.china.org.cn/business/txt/2016-07/04/content_38806293.htm

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>

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」



世界8カ所の電波望遠鏡を結び、2017年4月に、1週間の共同観測。
解像度は20マイクロ秒角（視力300万、月面のゴルフボールを判別できる能力）。
2年間のデータ解析で1枚の写真をつくる。

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



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

The Event Horizon Telescope Collaboration

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

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

Abstract

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

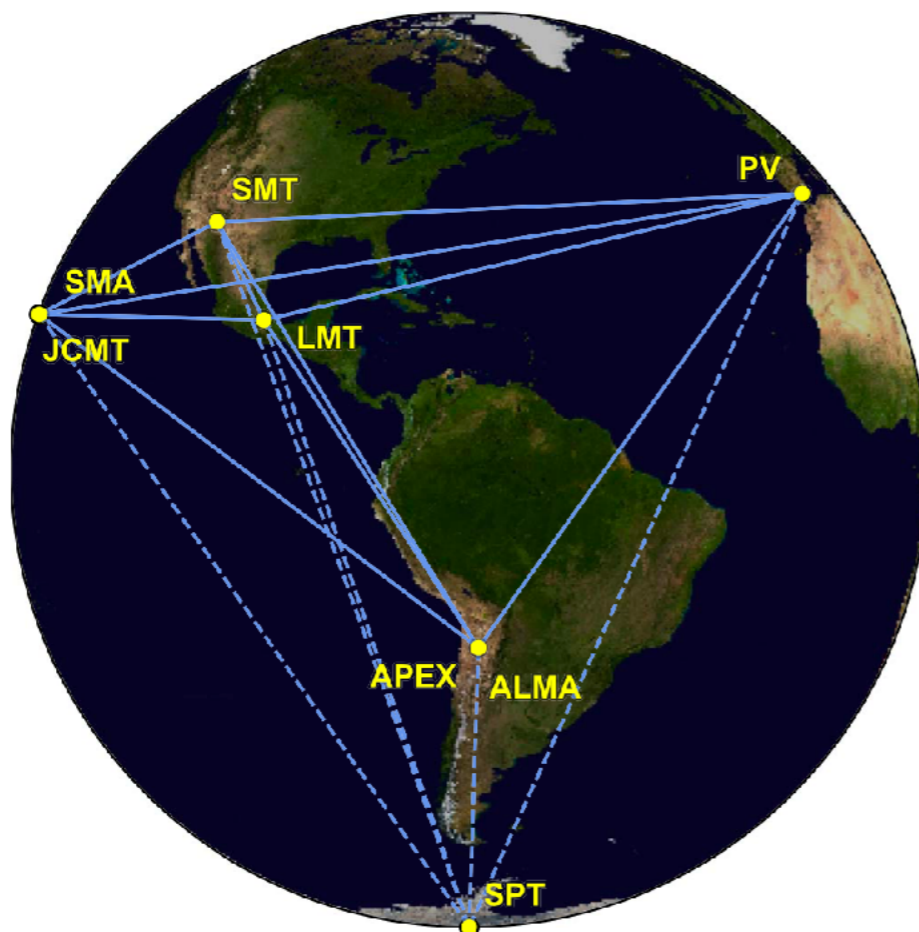


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

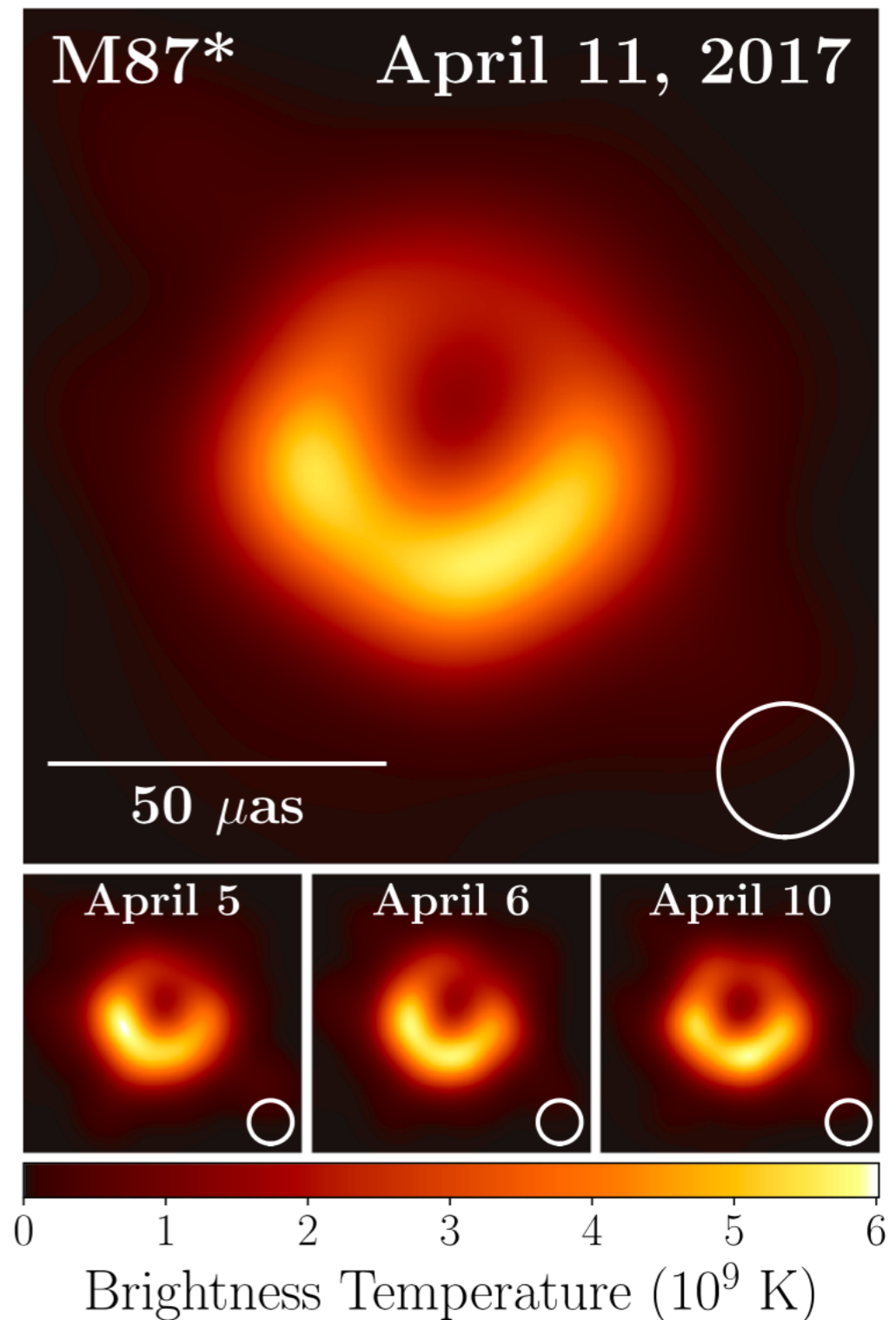
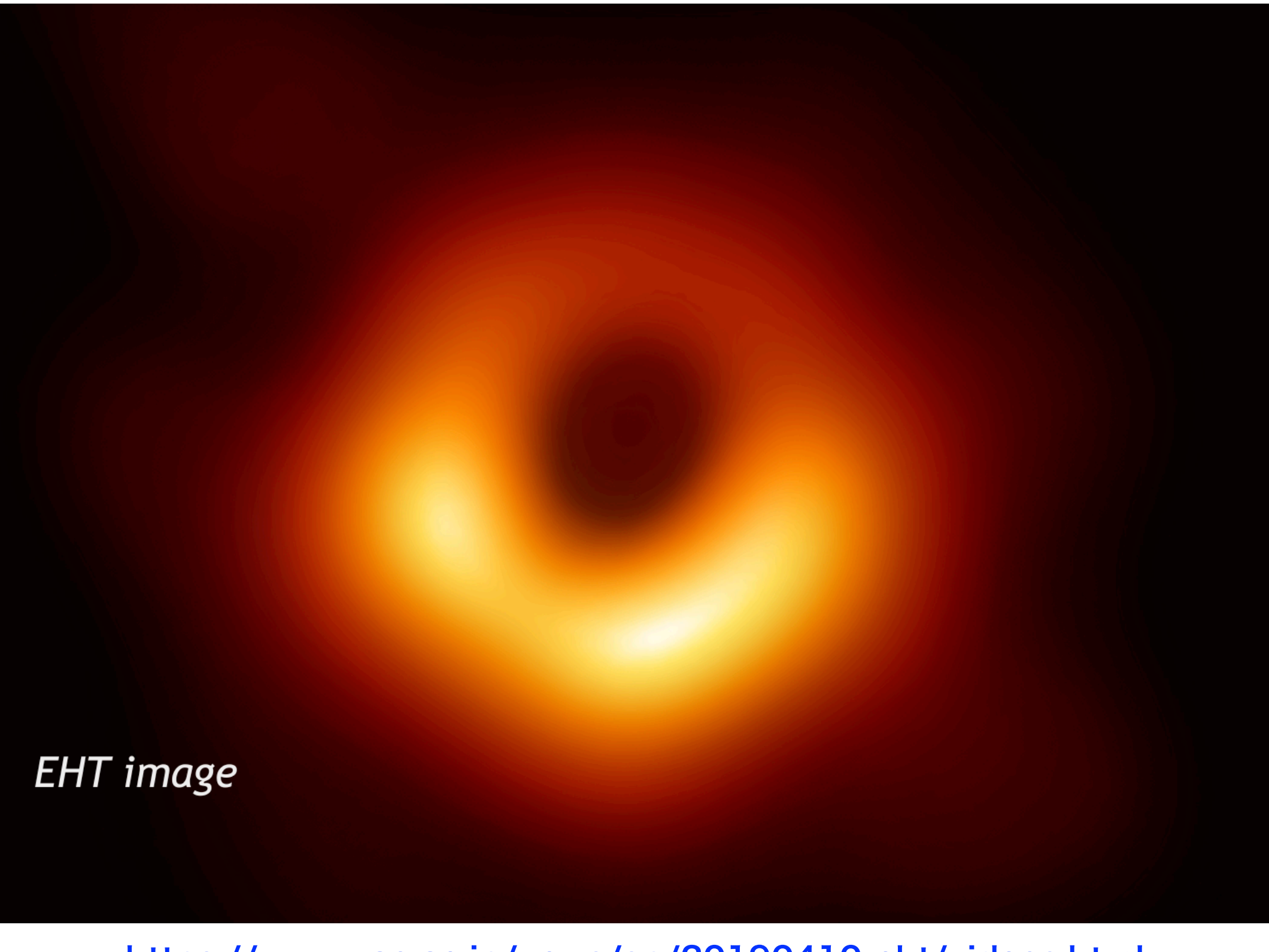


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the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

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

The image shows a central dark circular region, the shadow of the black hole, surrounded by a bright, glowing ring of light. The colors transition from dark red in the center to bright yellow and white at the ring's edge, then back to dark red and black in the background. The overall appearance is that of a glowing ring with a dark center.

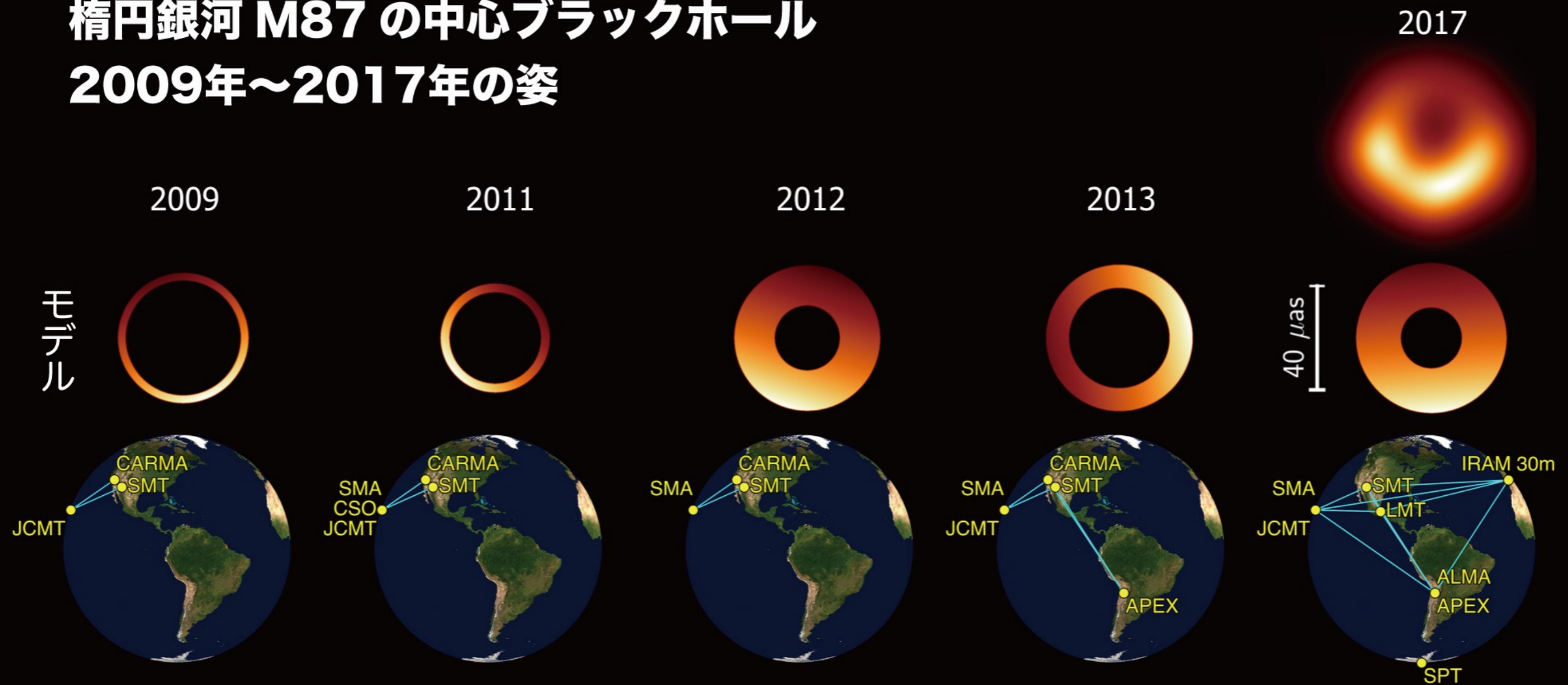
EHT image

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

0'58"

M87 ブラックホールのリング像は揺れ動いていた

楕円銀河 M87 の中心ブラックホール 2009年～2017年の姿



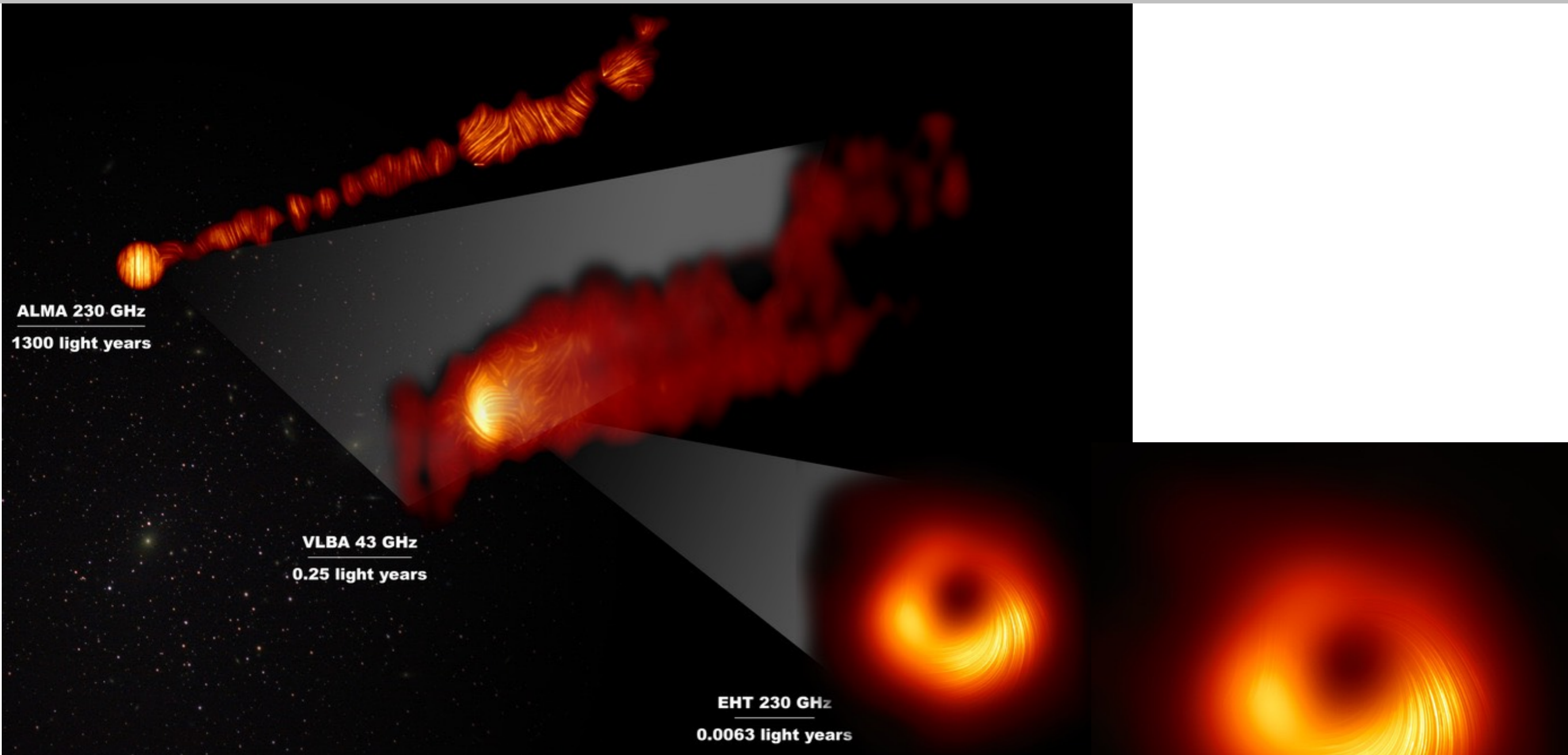
Event Horizon Telescope

Credit: M. Wielgus, D. Pesce

ブラックホールを取り囲む非対称なリング構造が8年間にわたり定常的に存在する一方で、リングの明るい部分の向きが揺れ動いていた。（過去の試験データを解析）

<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20200923>

M87 ブラックホール近傍の偏波画像. (周辺の磁場の向きを表す)



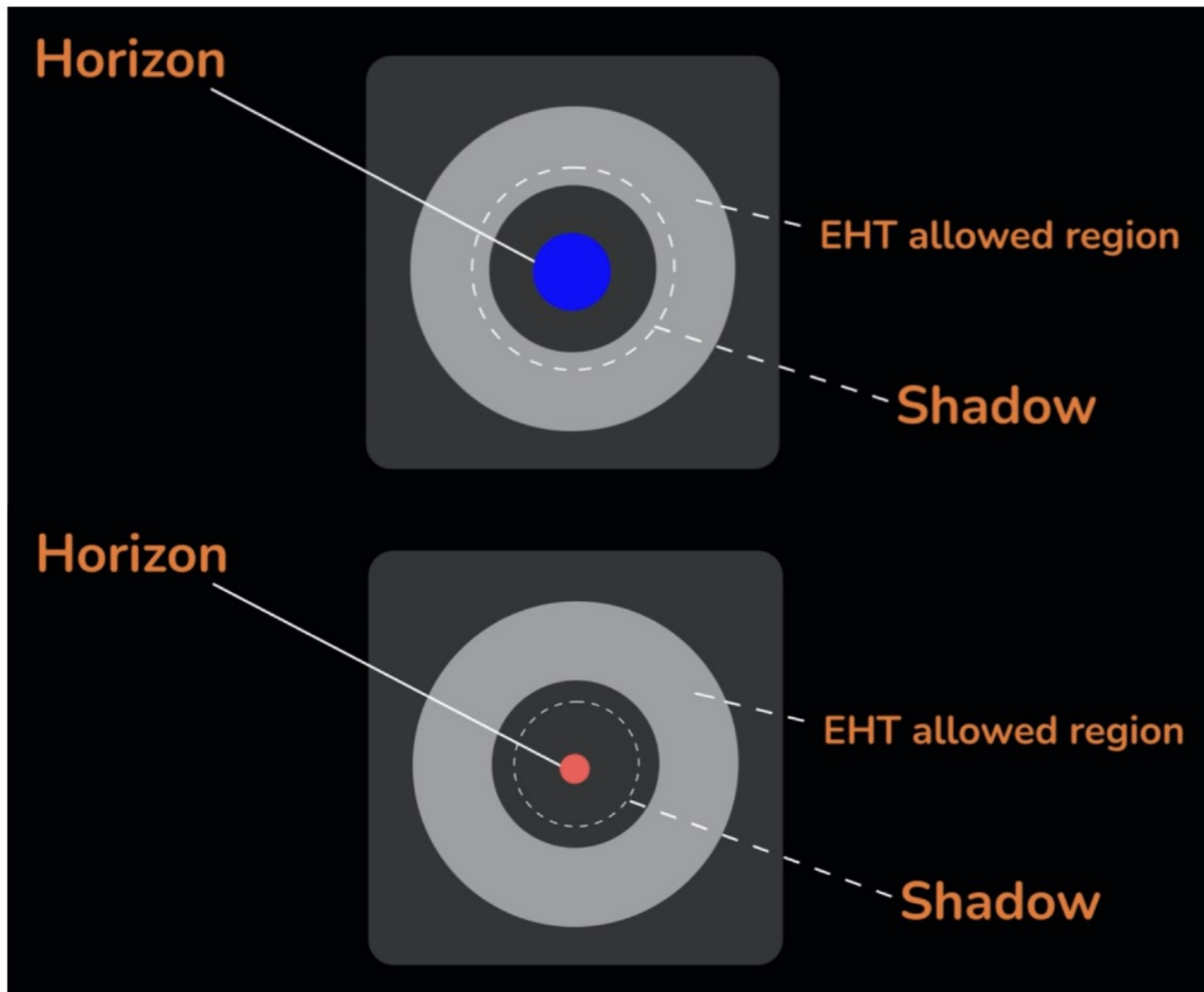
M87は最も代表的な活動銀河ジェット天体の1つ

2017年データを再解析. 電波の偏光の画像を得た.

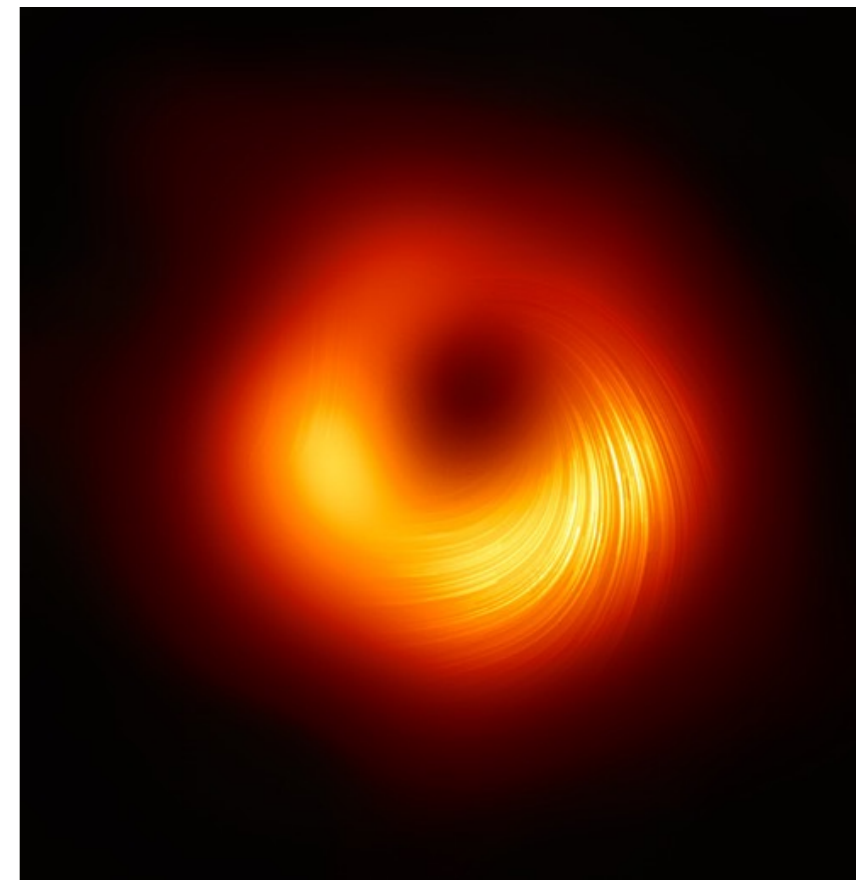
→ ブラックホール周囲の磁場について, 初めての情報となった

<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20210324>

M87 ブラックホールの画像で、相対性理論の検証



理論によって、ブラックホール・シャドウの大きさは異なる。



→ M87の観測データは、一般相対性理論と見事に一致し、
超ひも理論に基づく重力理論ともある程度一致

ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. **ブラックホールはどうできた？**
星の進化シナリオ
4. ブラックホールの未解決問題
 - A. 銀河中心ブラックホールの形成
 - B. 時空特異点の問題
 - C. 重力波観測で見つかった正体不明天体
 - D. 相対性理論はどこまで正しい理論か

ブラックホールができるまで

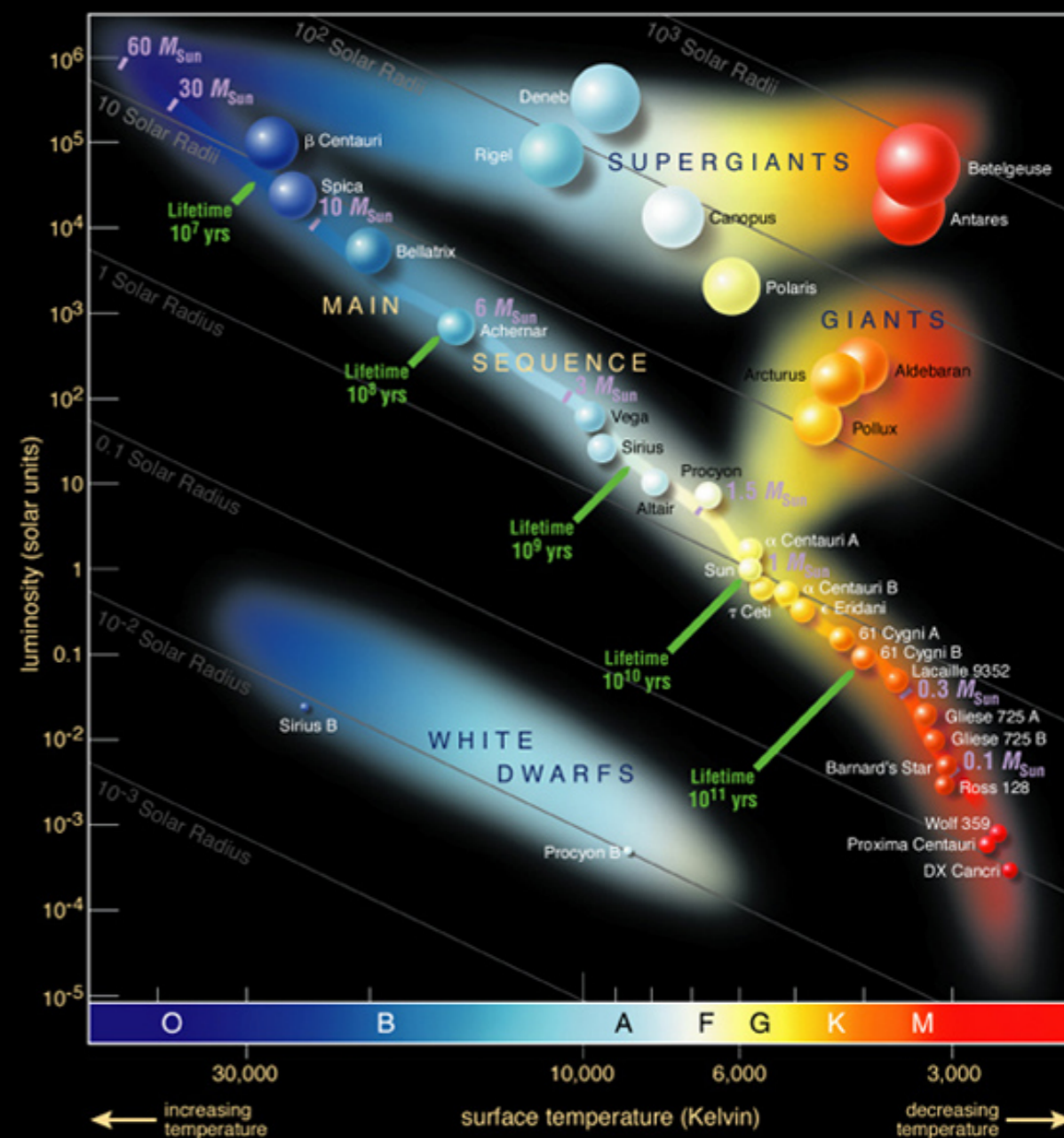
星は何を燃やしているのか？

燃え尽きた星はどうなるのか？

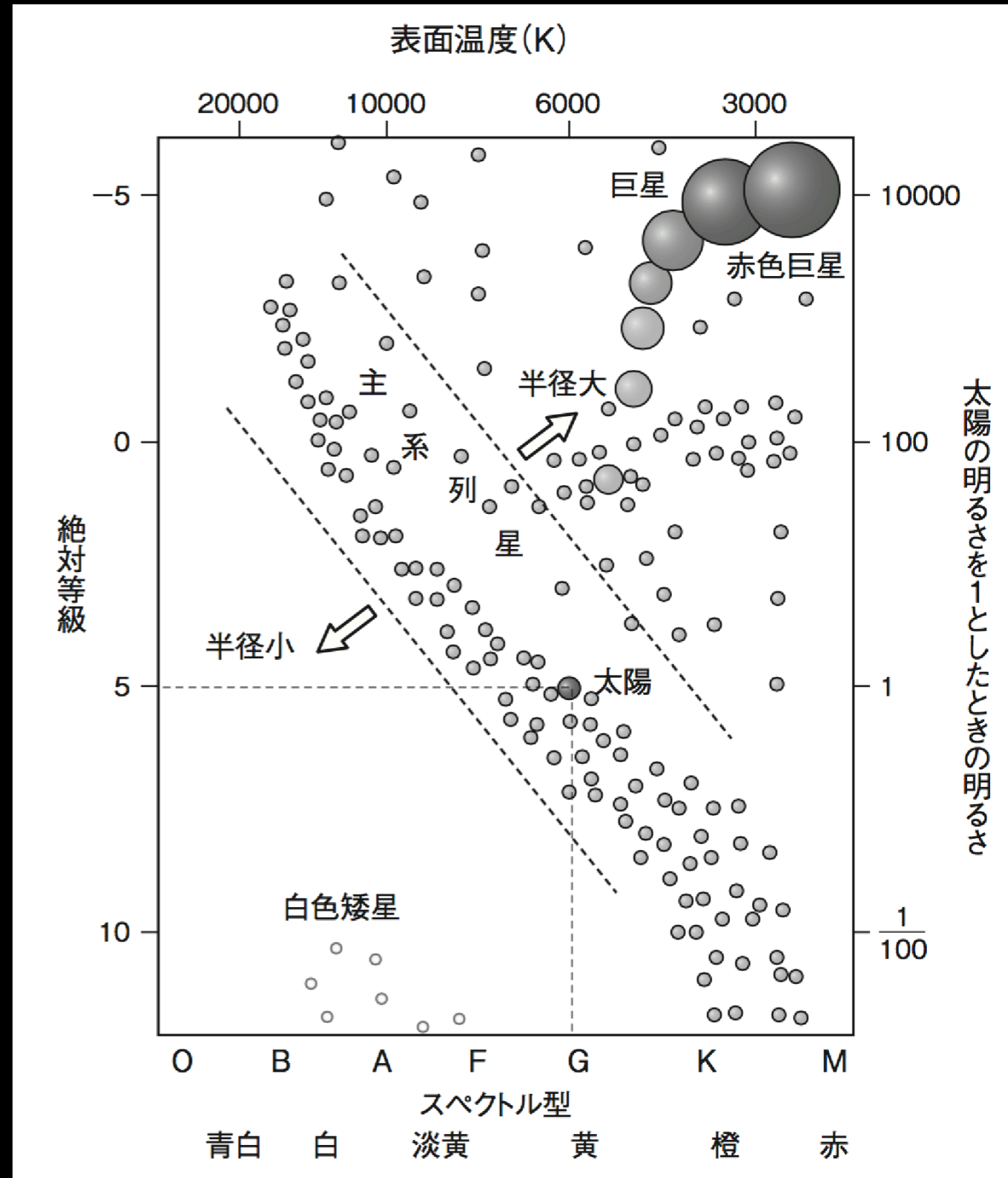
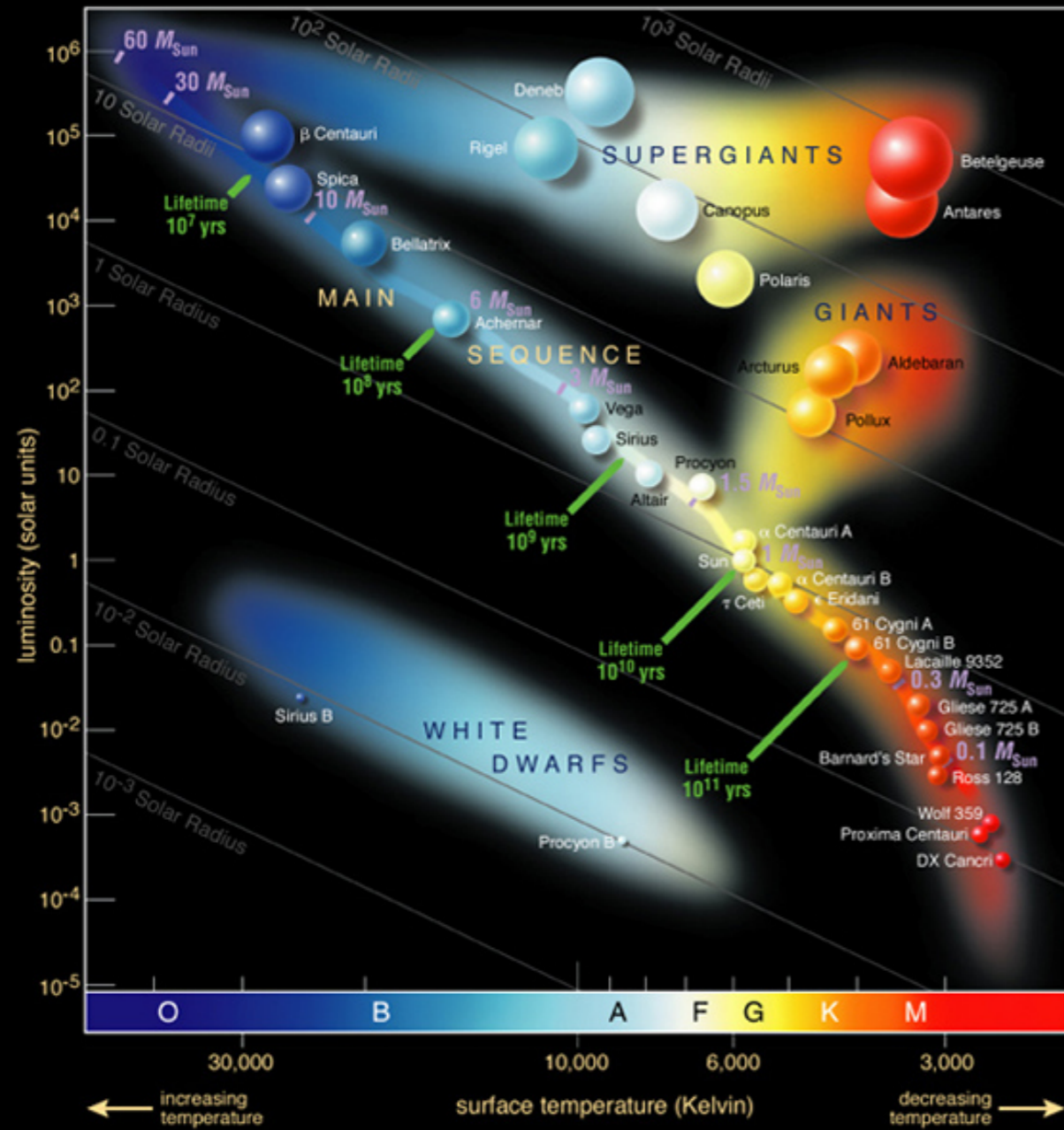
1920年代, 星の燃える理由が, 核融合による
 $E=mc^2$ の式で説明できることがわかった.

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.



ヘルツシュプルング・ラッセル図 (HR図)



コラム 18 酸素がない宇宙で太陽が燃えているのは何故？

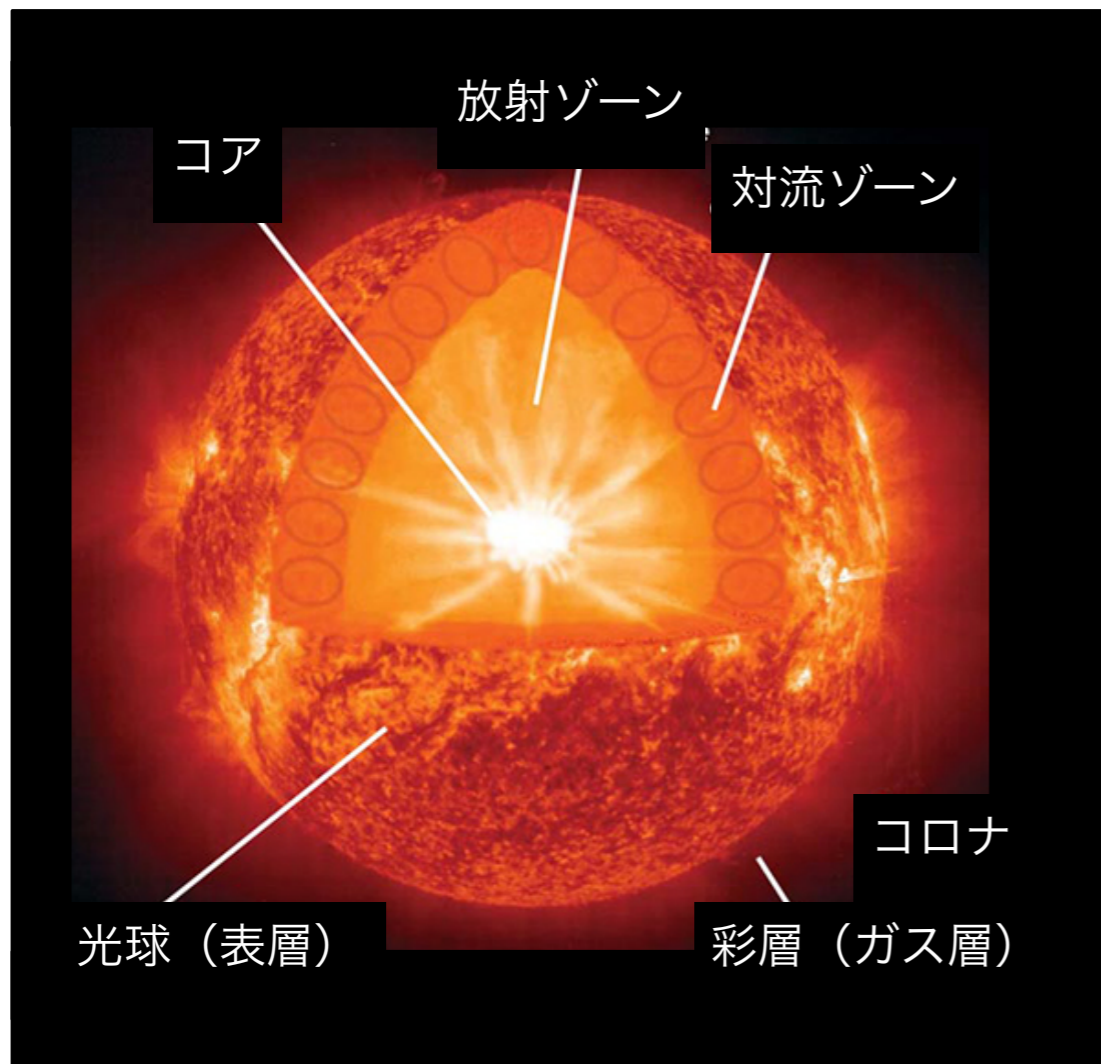
太陽系の起源は約 50 億年前と考えられている。物理学がそろい始めた 19 世紀末、太陽のエネルギー源は何か、という大問題が解けずにいた。（当時、太陽の年齢は 3 億年以上ということしかわかっていなかったが）単純に化学反応で説明するには寿命が長すぎていたのだ。ケルビンとヘルムホルツ (von Helmholtz, H. L. F. 1821–94) は「太陽は大きな重力で収縮しているため、周囲に熱を放出する」という説を考えたが、それでも太陽年齢は 2000 万年以上にはならなかった。

決定的な理論となったのは、アインシュタインが 1905 年に提出した相対性理論による、 $E = mc^2$ という式である。この式から、1920 年、天文学者エディントン (Eddington, A. S. 1882–1944) は、太陽内部での水素からヘリウムへの核融合の可能性を指摘している。太陽が水素で満たされていることが 1925 年にわかり、1930 年代に物理学者チャンドラセカール (Chandrasekhar, S. 1910–95) とベーテ (Bethe, H. 1906–2005) によって核融合の理論が進むと、太陽のエネルギー源が核融合反応であることがようやく明らかになる。

このコラムのタイトルにした疑問はよく科学館に寄せられる質問だそうだ。核融合反応は物理的な結合エネルギーの組み替えで発生している反応であり、化学的燃焼とは違うので酸素は不要なのである。

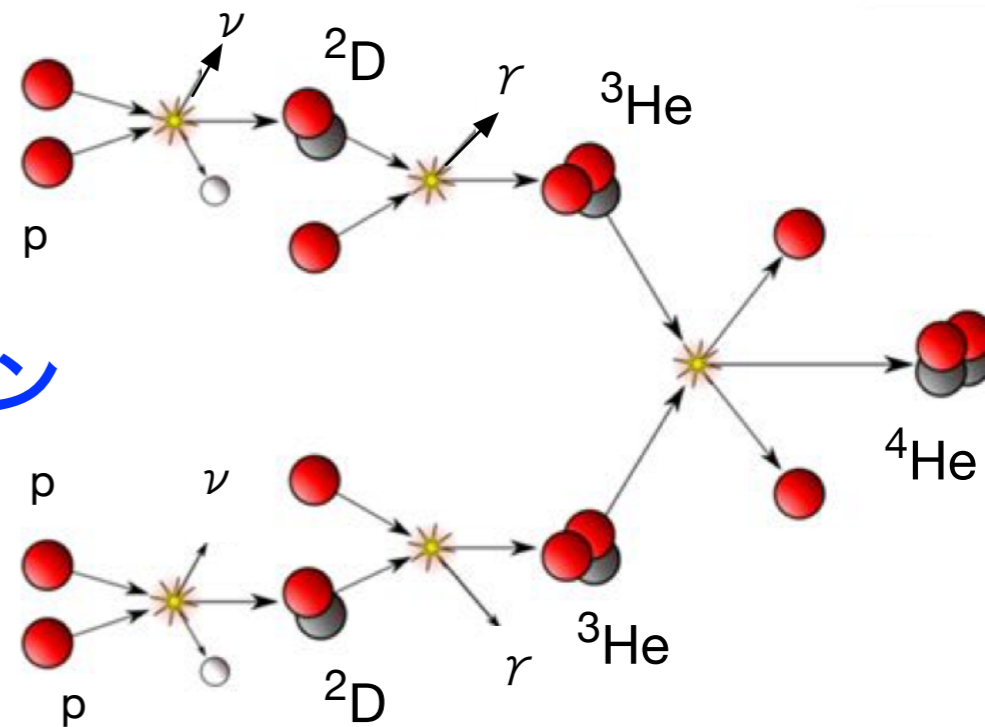
水素からヘリウムへ

さらに重元素への核融合

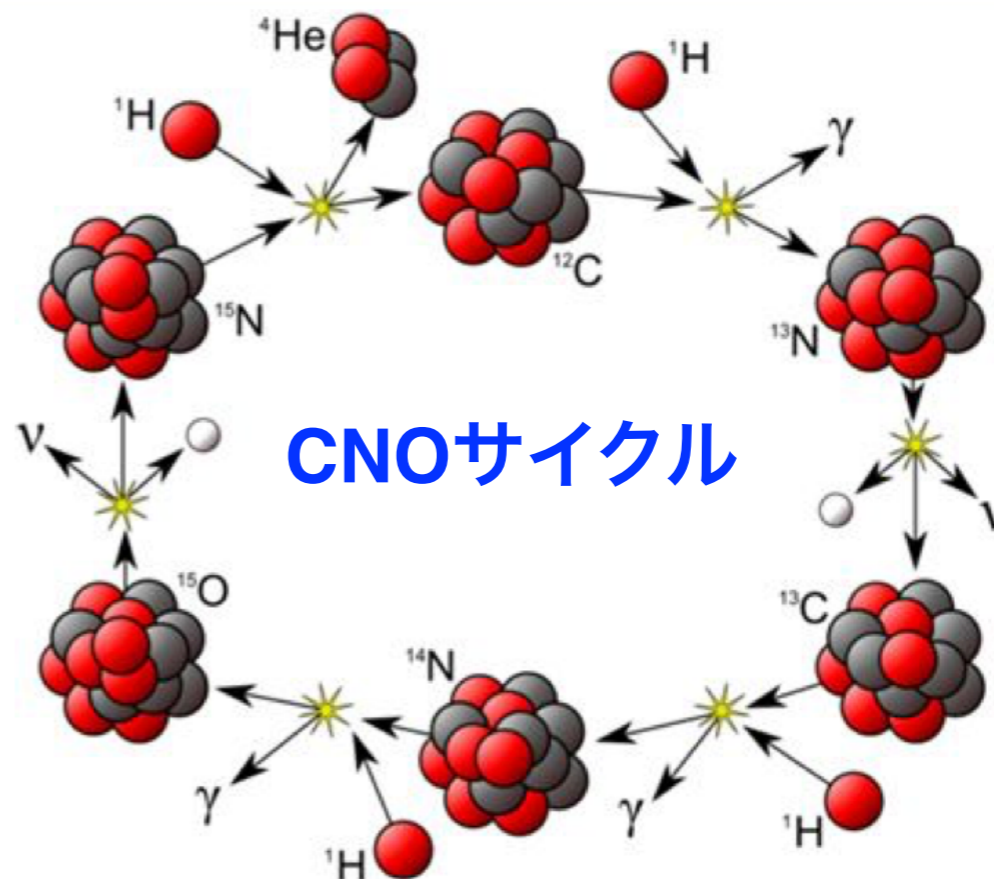


- 陽子(proton)
- 中性子(neutron)
- 陽電子(positron)
- γ ガンマ線
- ν ニュートリノ

ppチェーン



CNOサイクル



The Convection Zone

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

The Corona

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

The Radiative Zone

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

Sun's Core

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

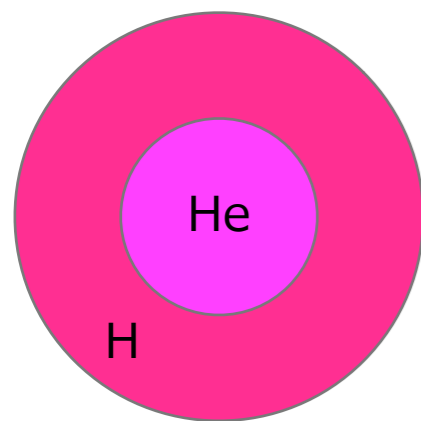
The Chromosphere

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

Coronal Streamers

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

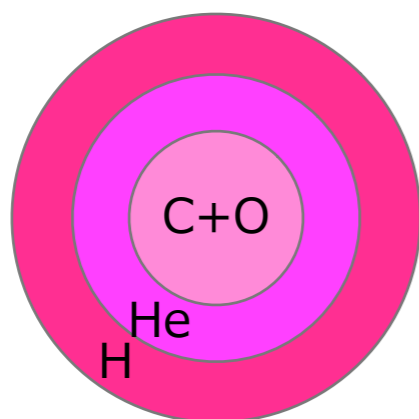
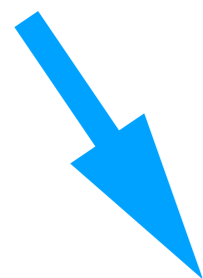
水素からヘリウムへ さらに重元素への核融合



水素HからヘリウムHeへ (pp chain)

中心部がHeになると，核融合止まる。

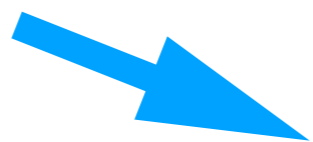
冷却し，収縮し，温度上昇して，次の核融合に点火



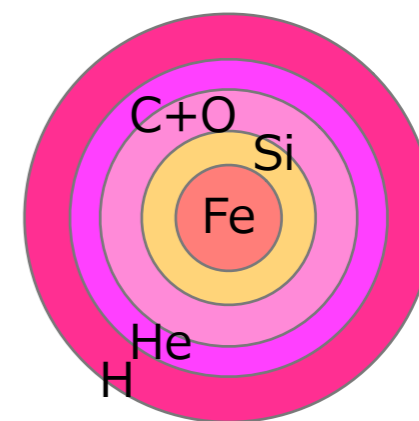
ヘリウムHeからCNOへ (pp chain)

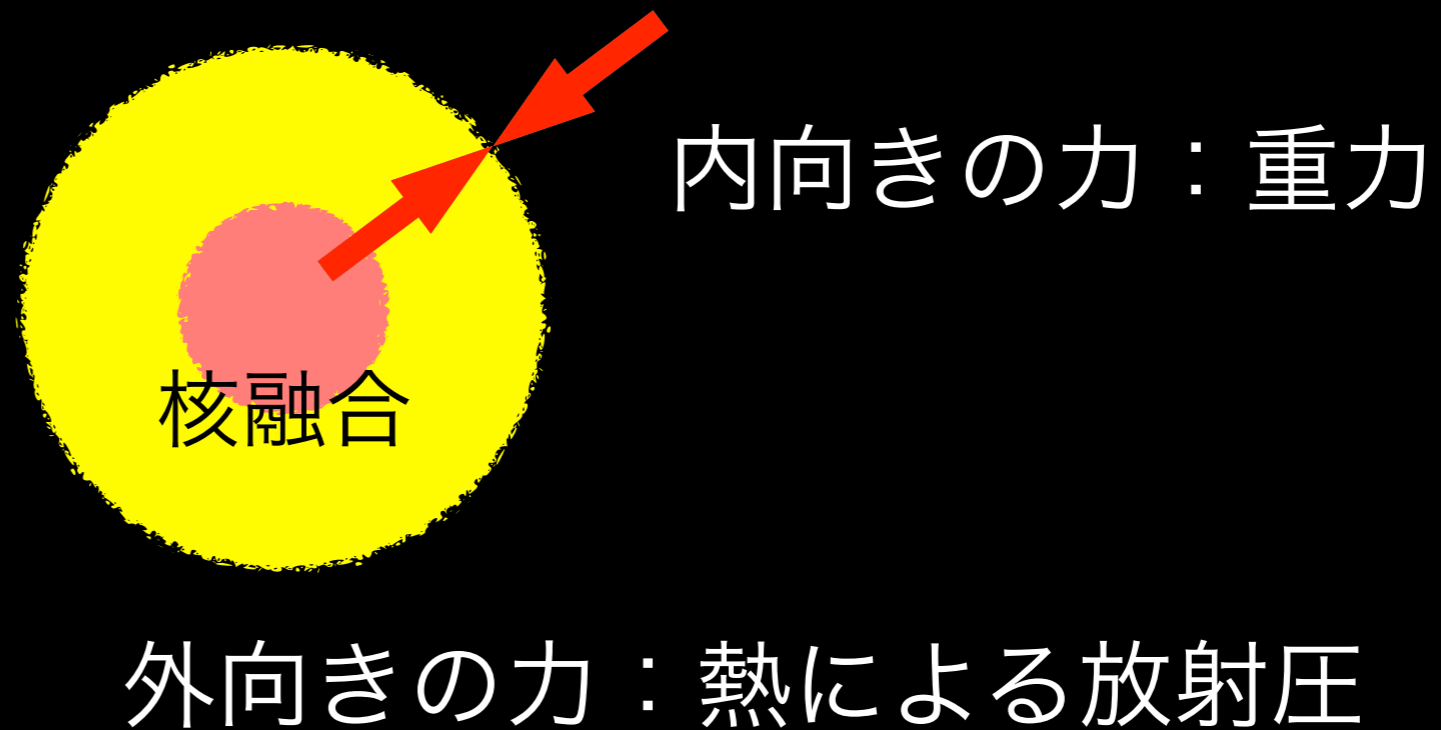
中心部がCNOになると，核融合止まる。

冷却し，収縮し，温度上昇して，次の核融合に点火



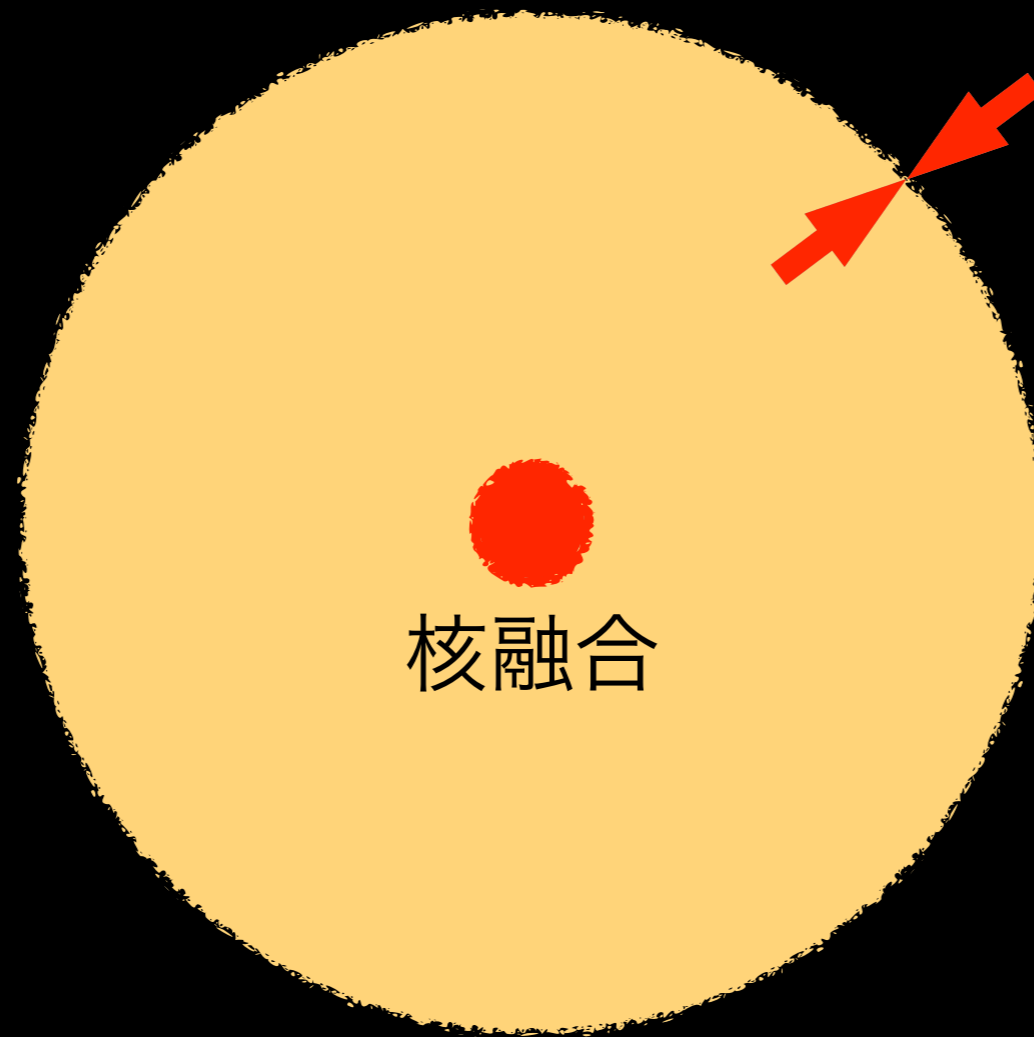
中心部がFeになると，...





*現在の太陽：水素がヘリウムに核融合

*放射圧＝重力 となるところで星の半径が決まる



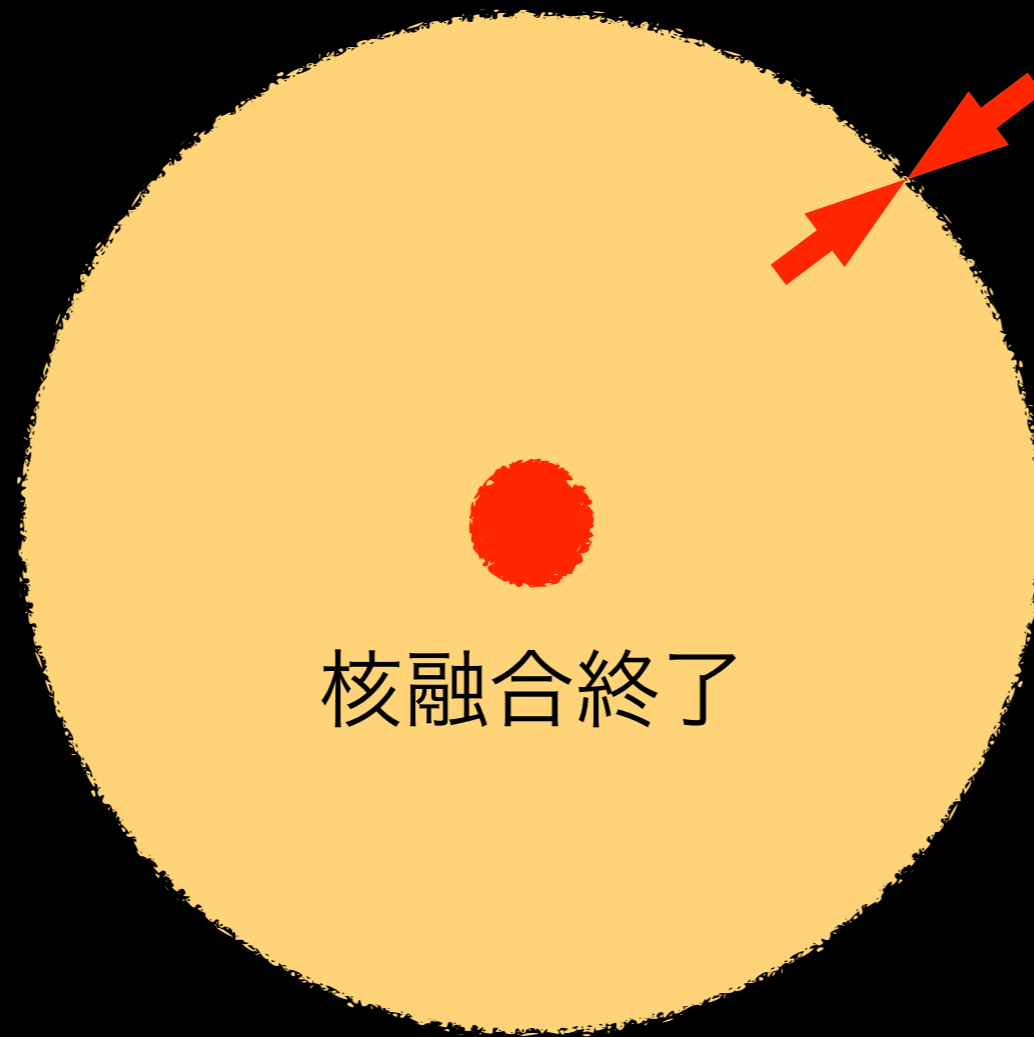
内向きの力：重力

外向きの力：

熱による放射圧

*核融合反応で質量をエネルギーに変換し続けると、
軽くなるので重力が弱くなる。

*放射圧=重力 となるところで星の半径が決まる



内向きの力：重力

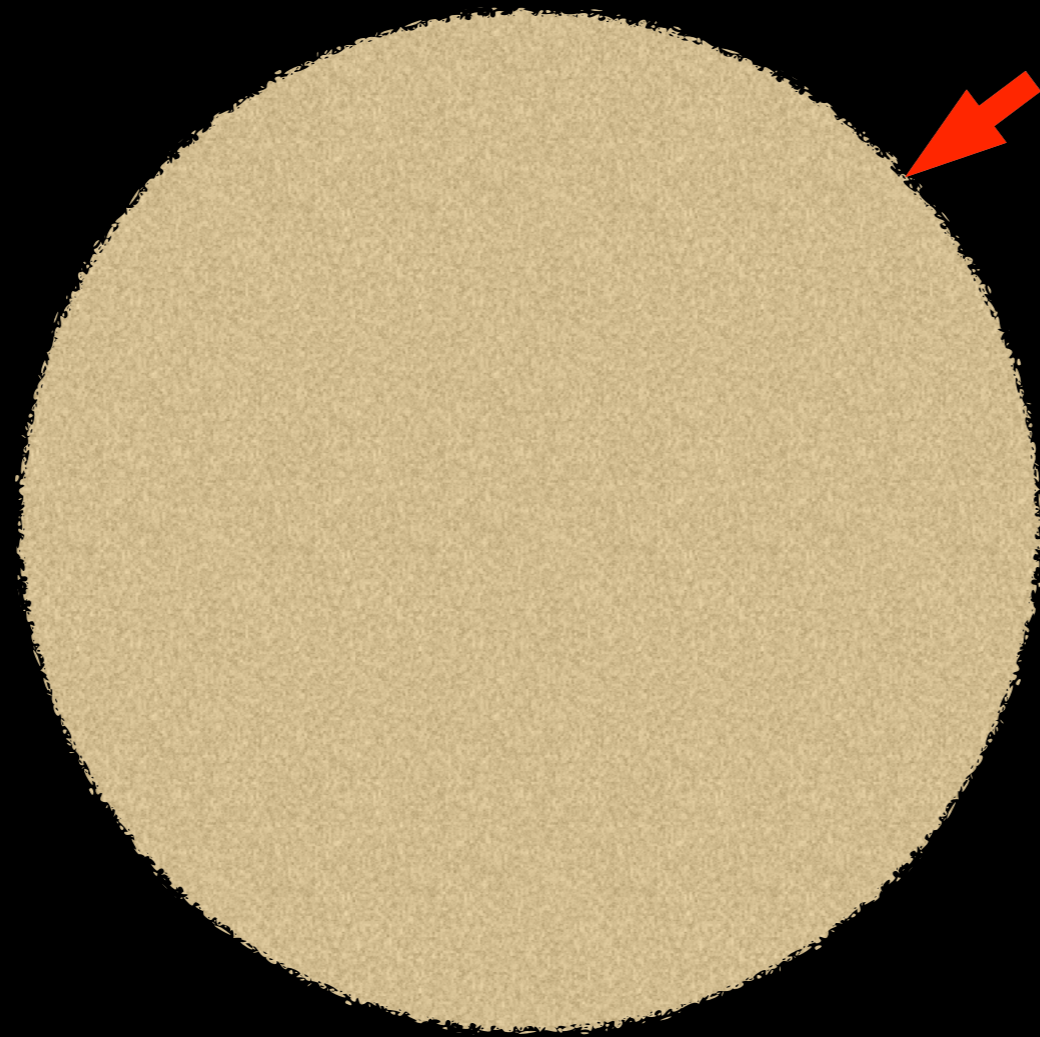
外向きの力：

熱による放射圧

*核融合反応は鉄まで進むと終了

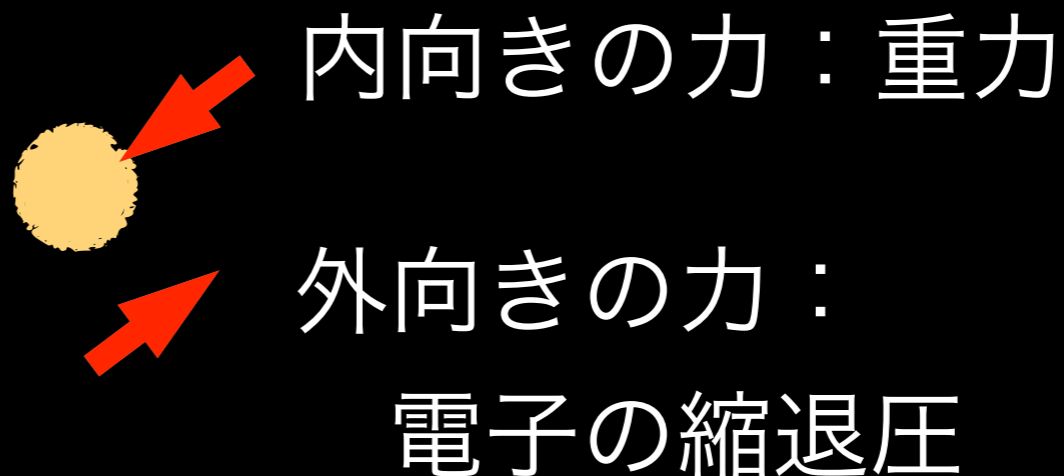
*放射圧がなくなるので星の収縮が始まる

超新星爆発のしくみ (4) 収縮する



内向きの力：重力

*収縮が始まる



*密につまった物質が星を支えるようになる

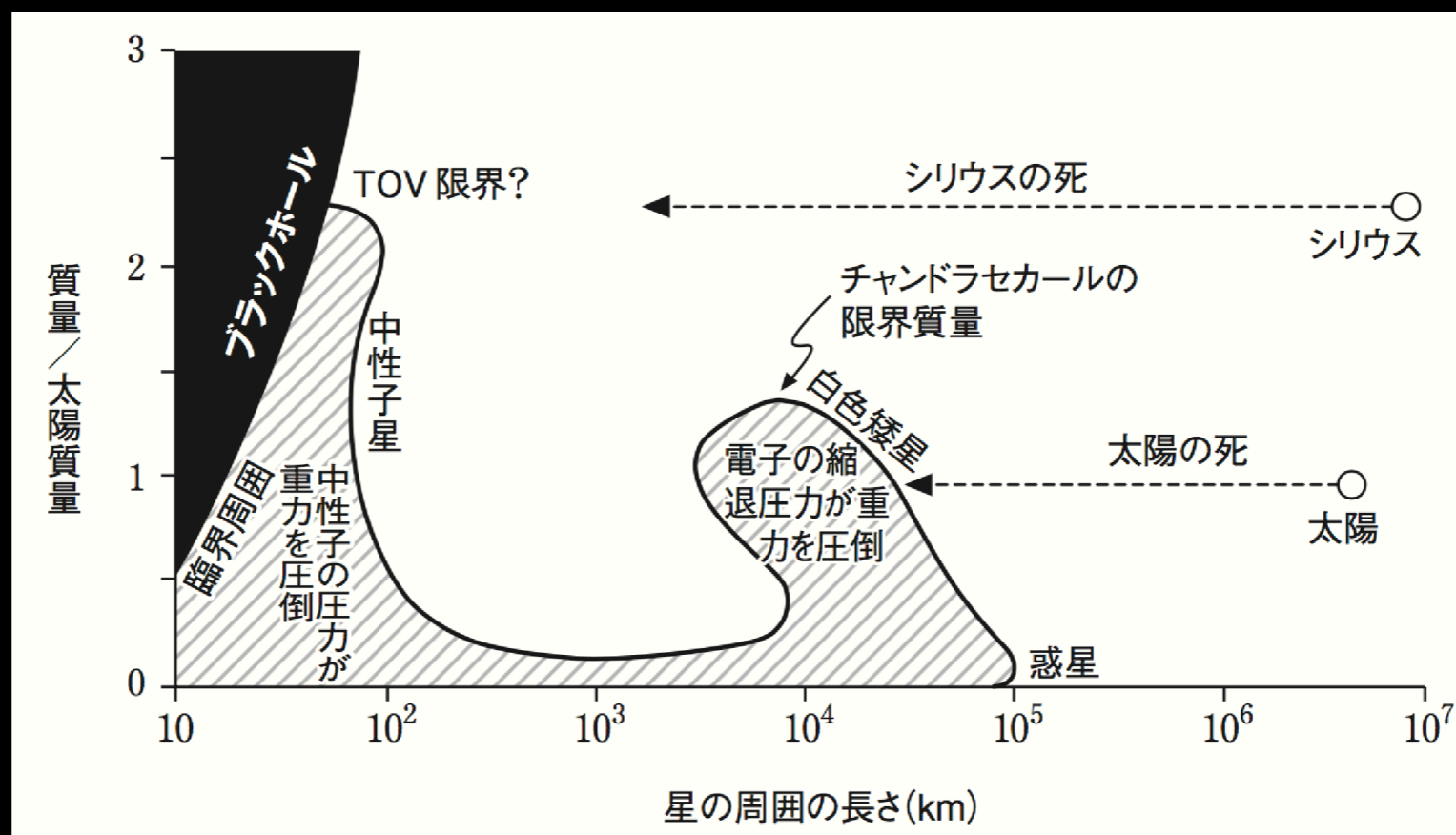
【運命その1】 電子の縮退圧で支える「白色矮星」になる

1933年チャンドラセカールの考え

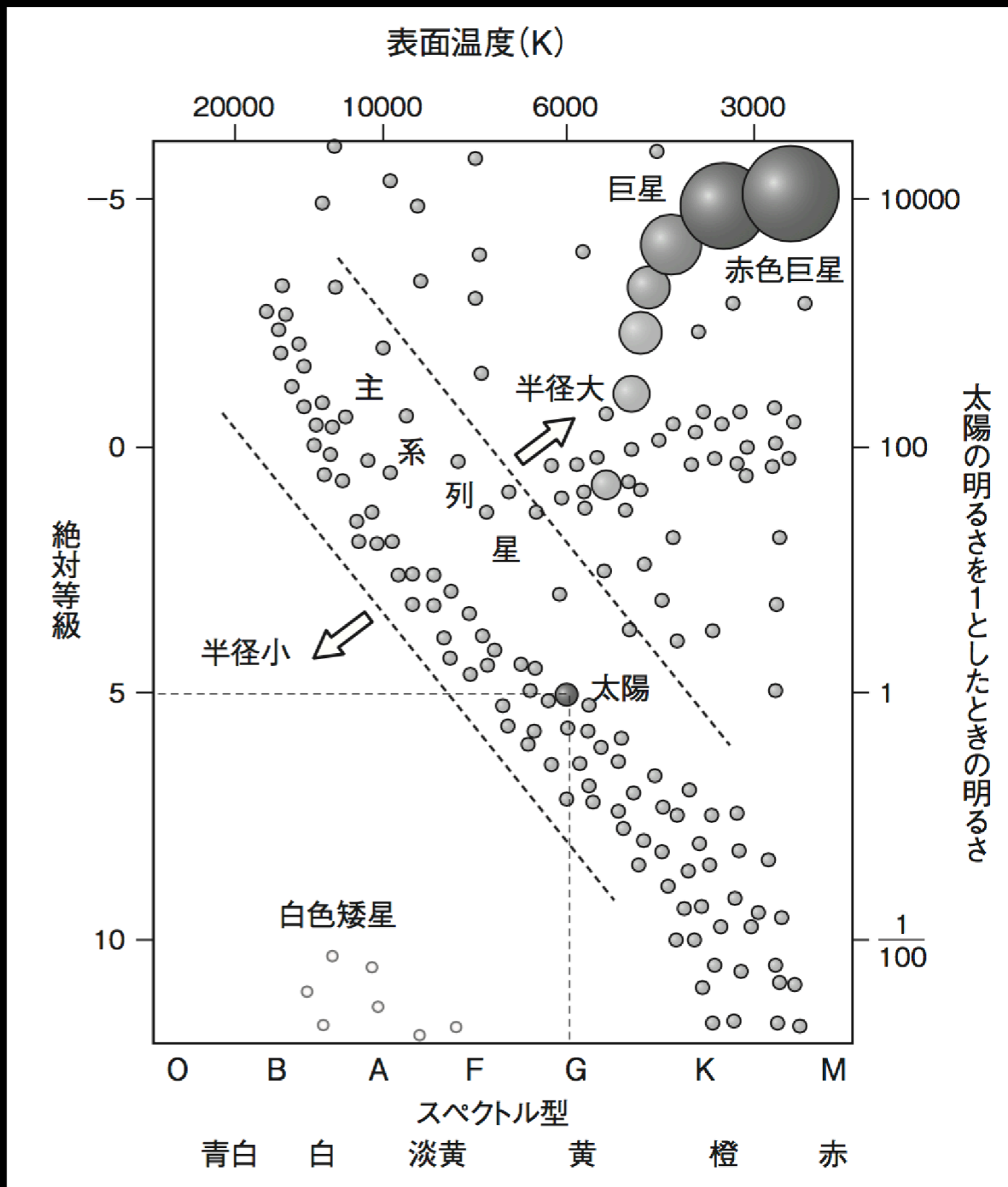
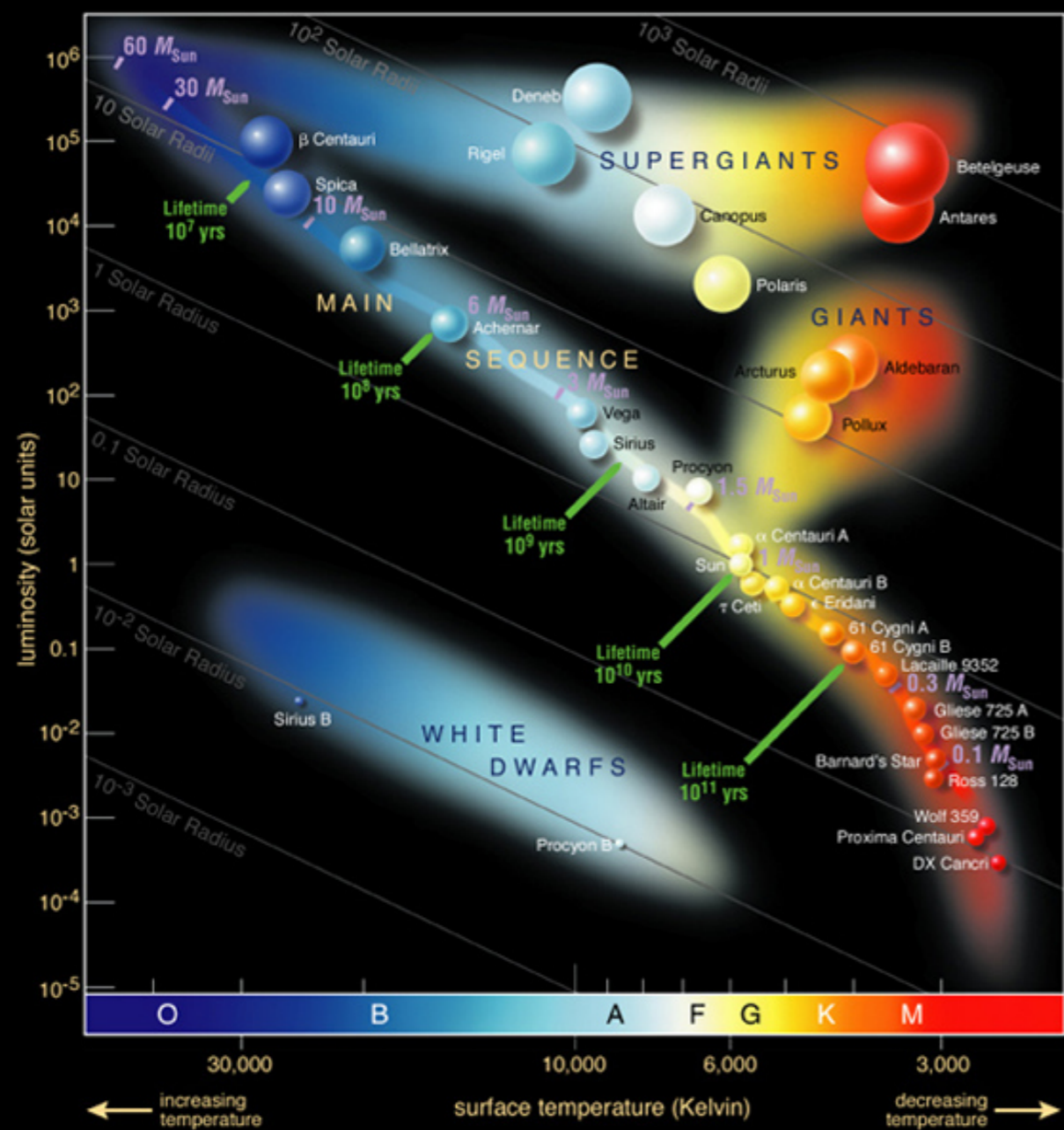
3.4 相対論の産物：(1) ブラックホールと時空特異点

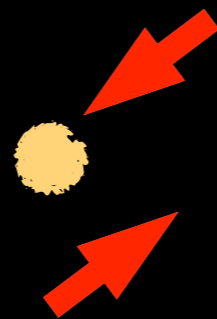
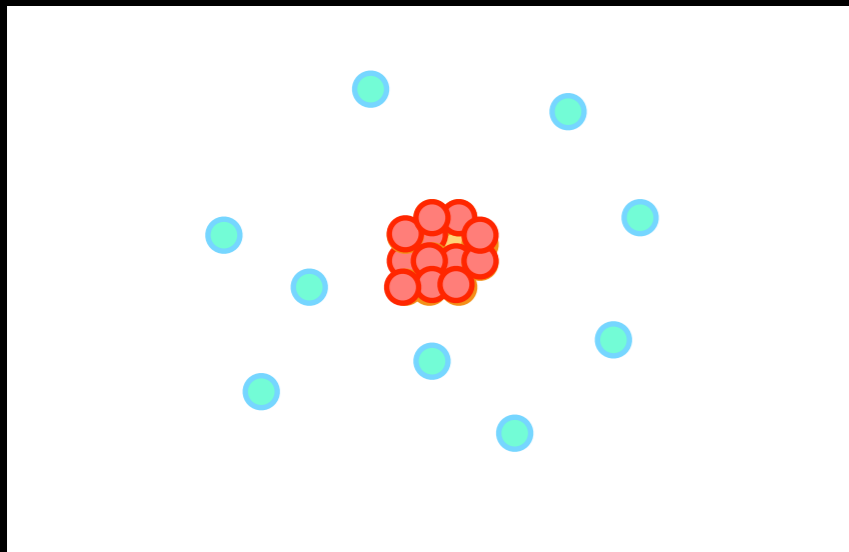
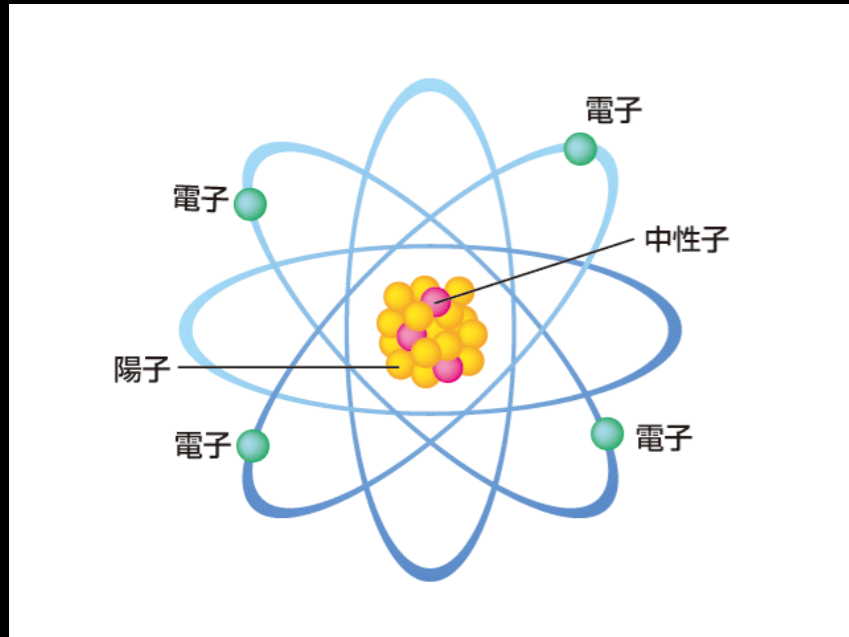
本当に、このような天体は存在するのか。

1930年代はじめ、チャンドラセカールは、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





内向きの力：重力

外向きの力：
中性子の縮退圧

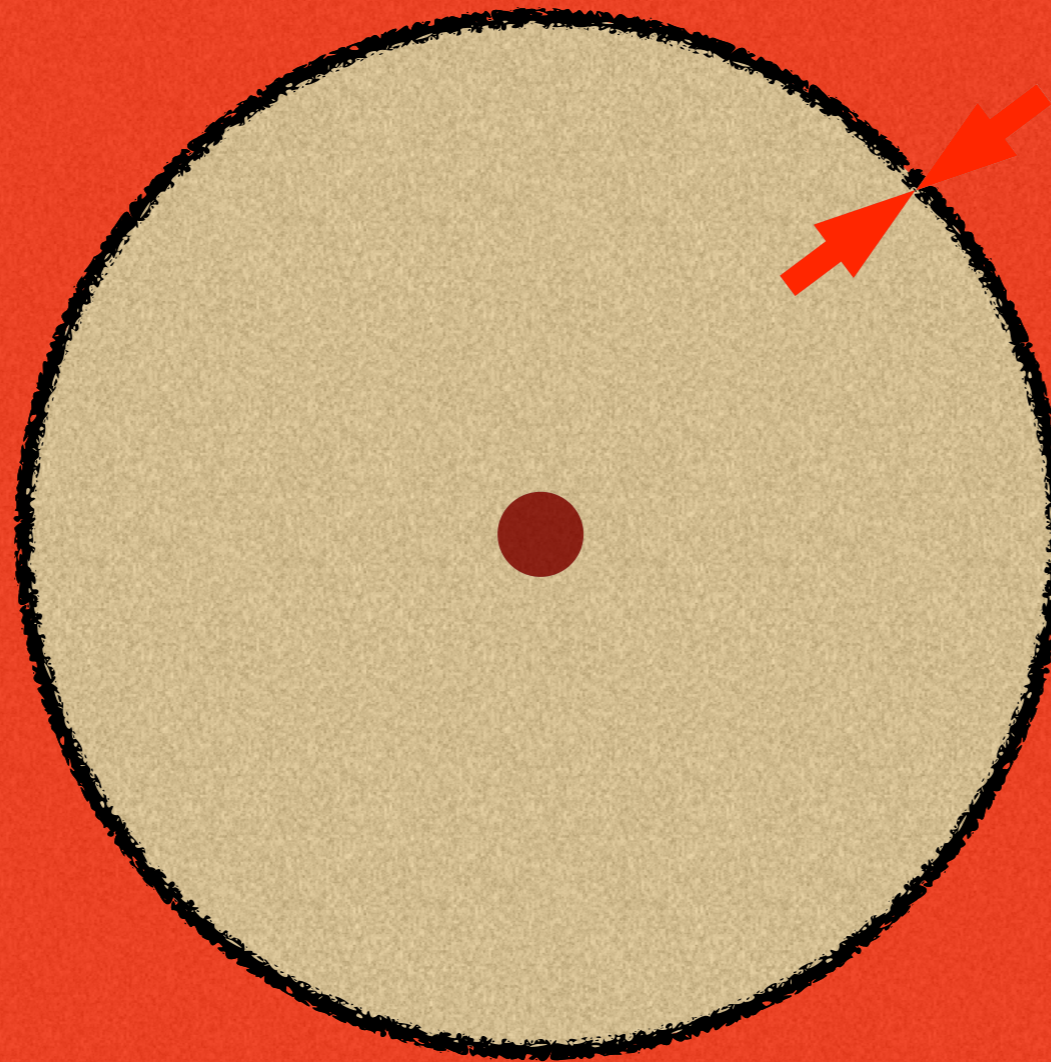


*密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その2】 中性子の縮退圧で支える「中性子星」になる

1938年ツヴィツキーの考え

超新星爆発のしくみ (6) さらに降り積もると...



内向きの力：重力

外向きの力：

中性子の縮退圧

硬い殻ができる

*収縮が始まる

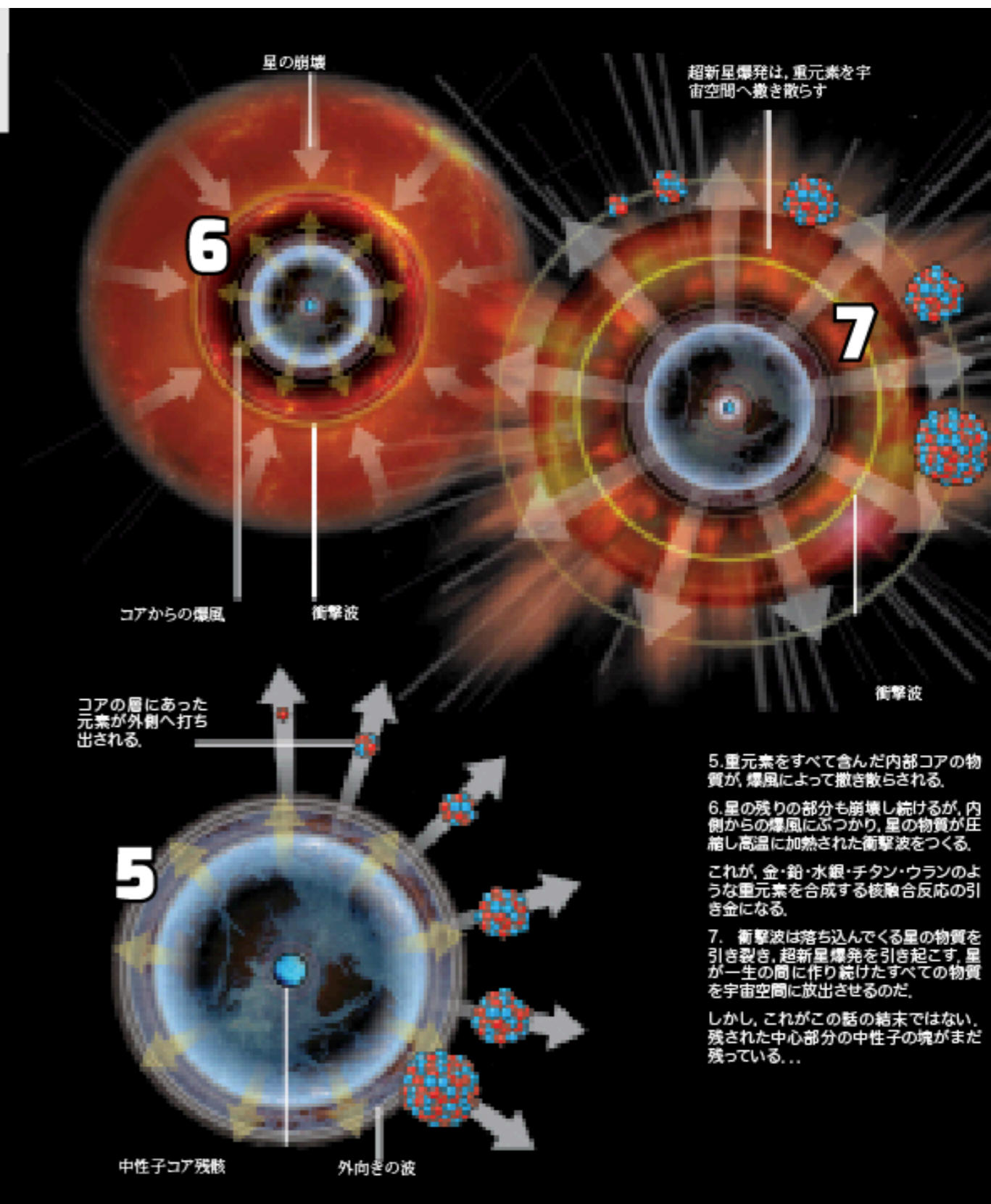
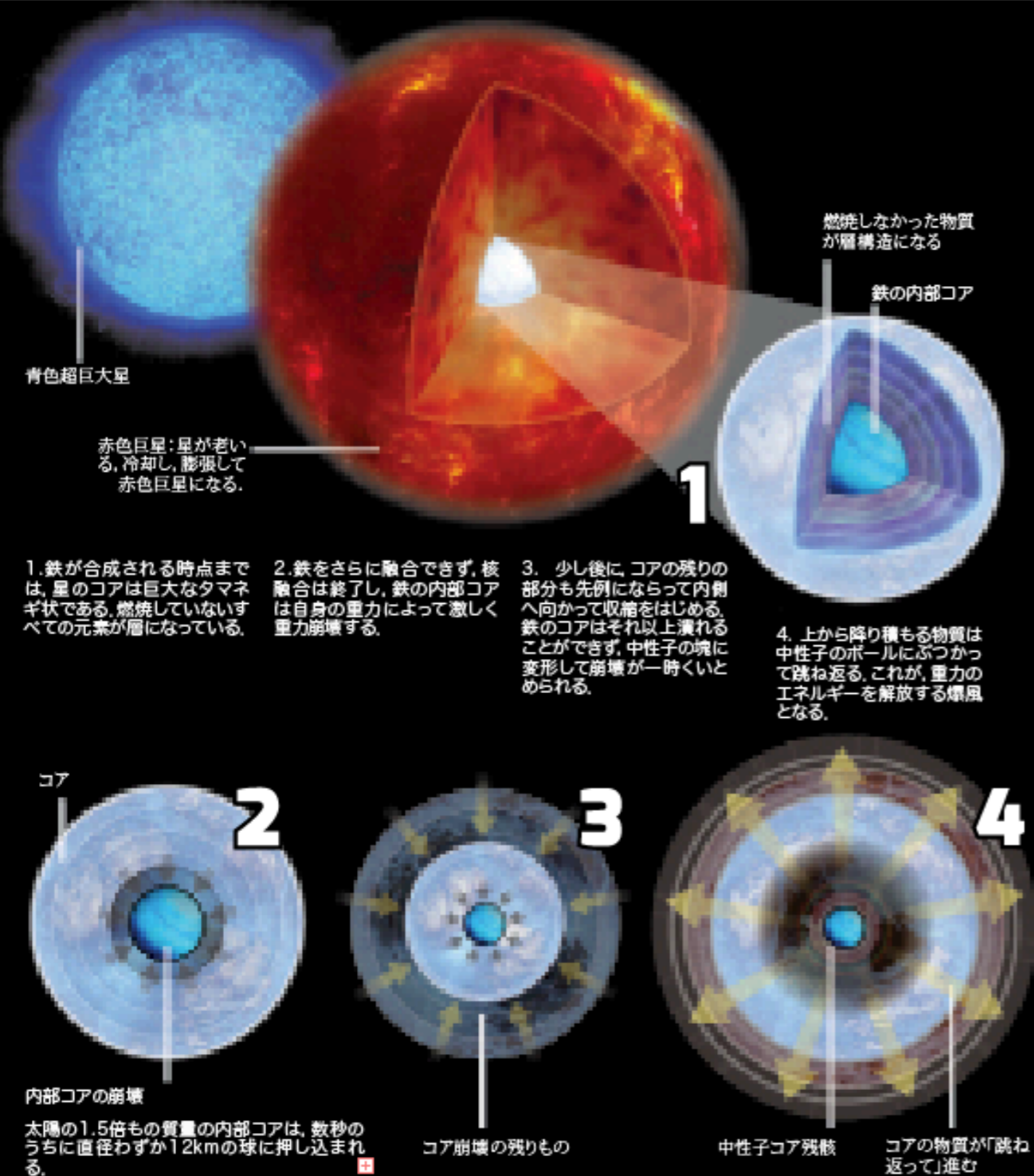
中性子の塊ができる。

さらに外側からガスが落下すると...

星の一生

ダイハード:重元素を合成するまでは死ねない

鉄の核融合を発生させるには、エネルギーを解放するよりも多くのエネルギーを必要とする。ひとたび星のコアに鉄ができれば、それは死を意味する。核融合反応は終了し、星は重力の報酬を受けることになる。重元素が合成されるのは、この星の断末魔の時期である。



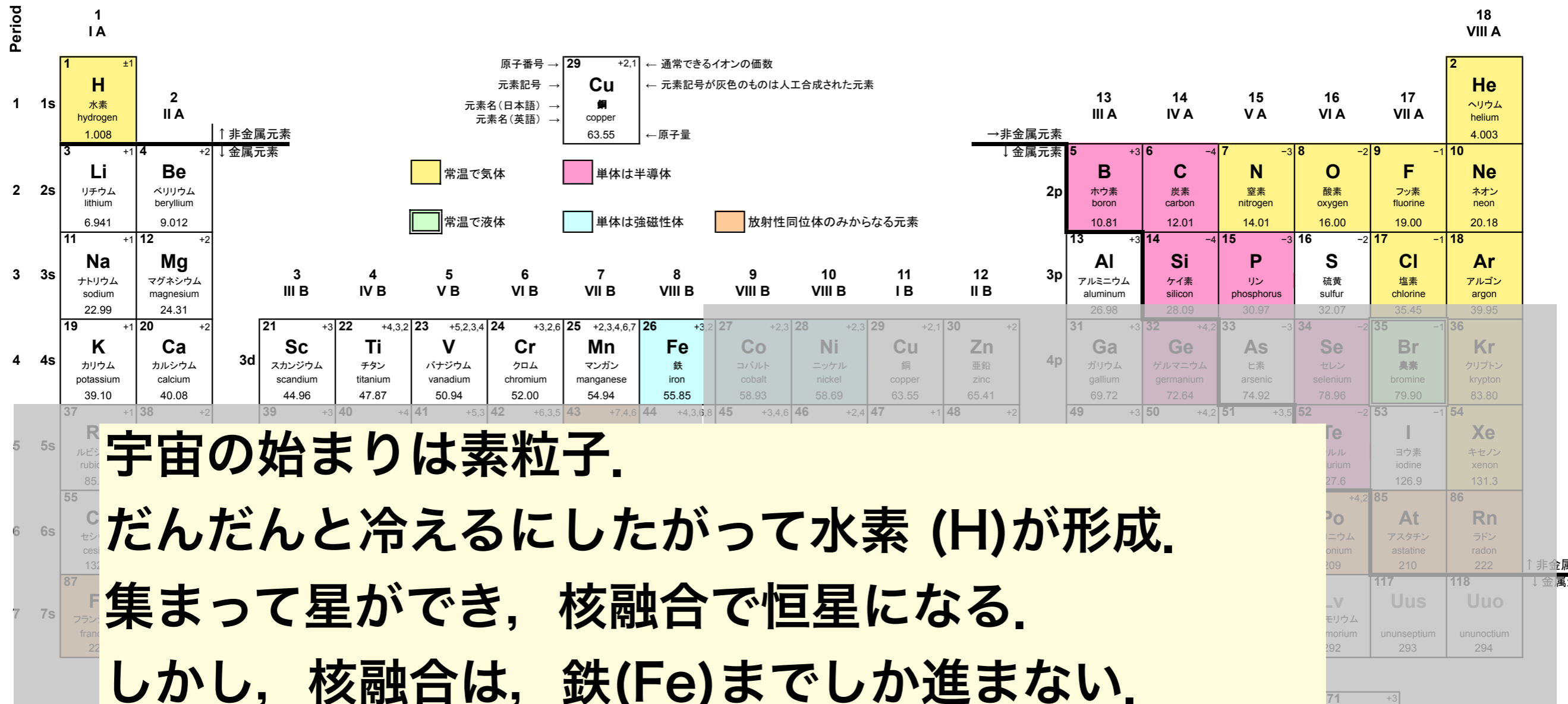
周期表 (periodic table)

Period	1	1A																	18	VIII A			
	1	1s	1													2							
			H													He							
			水素 hydrogen 1.008													ヘリウム helium 4.003							
			±1																				
			↑ 非金属元素																				
			↓ 金属元素																				
2	2s	3	4											5	6	7	8	9	10				
		Li	Be											B	C	N	O	F	Ne				
		リチウム lithium 6.941	ベリリウム beryllium 9.012											ホウ素 boron 10.81	炭素 carbon 12.01	窒素 nitrogen 14.01	酸素 oxygen 16.00	フッ素 fluorine 19.00	ネオン neon 20.18				
		+1	+2											+3	-4	-3	-2	-1					
		↑ 非金属元素	↓ 金属元素											↓ 非金属元素	↓ 金属元素								
		常温で気体	単体は半導体											常温で液体	単体は強磁性体	放射性同位体のみからなる元素							
3	3s	11	12											13	14	15	16	17	18				
		Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
		ナトリウム sodium 22.99	マグネシウム magnesium 24.31											アルミニウム aluminum 26.98	ケイ素 silicon 28.09	リン phosphorus 30.97	硫黄 sulfur 32.07	塩素 chlorine 35.45	アルゴン argon 39.95				
		+1	+2											+3	-4	-3	-2	-1					
4	4s	19	20											21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		K	Ca											Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
		カリウム potassium 39.10	カルシウム calcium 40.08											スカンジウム scandium 44.96	チタン titanium 47.87	バナジウム vanadium 50.94	クロム chromium 52.00	マンガン manganese 54.94	鉄 iron 55.85	コバルト cobalt 58.93	ニッケル nickel 58.69	銅 copper 63.55	亜鉛 zinc 65.41
		+1	+2											+3	+4,3,2	+5,2,3,4	+3,2,6	+2,3,4,6,7	+3,2	+2,3	+2,3	+2,1	+2
5	5s	37	38											39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
		Rb	Sr											Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
		ルビジウム rubidium 85.47	ストロンチウム strontium 87.62											イットリウム yttrium 88.91	ジルコニウム zirconium 91.22	ニオブ niobium 92.91	モリブデン molybdenum 95.94	テクネチウム technetium 98	ルテニウム ruthenium 101.1	ロジウム rhodium 102.9	パラジウム palladium 106.4	銀 silver 107.9	カドミウム cadmium 112.4
		+1	+2											+3	+4	+5,3	+6,3,5	+7,4,6	+4,3,6,8	+3,4,6	+2,4	+1	+2
6	6s	55	56											57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
		Cs	Ba											ランタノイド	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg
		セシウム cesium 132.9	バリウム barium 137.3											lanthanides	ハフニウム hafnium 178.5	タンタル tantalum 180.9	タングステン tungsten 183.8	レニウム rhenium 186.2	オスミウム osmium 190.2	イリジウム iridium 192.2	白金 platinum 195.1	金 gold 197.0	水銀 mercury 200.6
		+1	+2											† 5d	+4	+5	+6,4	+7,4,6	+4,6,8	+4,3,6	+4,2	+3,1	+2,1
7	7s	87	88											89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
		Fr	Ra											アクチノイド	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn
		フランシウム francium 223	ラジウム radium 226											actinides	ラザホージウム rutherfordium 261	ドブニウム dubnium 262	シーボーギウム seaborgium 266	ボーリウム bohrium 264	ハッシウム hassium 277	マイタネリウム meitnerium 268	ダームスタチウム darmstadtium 281	レントゲニウム roentgenium 272	コペルニシウム copernicium 285
		+1	+2											‡ 6d	+4	+5,4	+6,3,4,5	+5,3,4,6	+4,3,5,6	+3,4,5,6	+3	+3,4	+3

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

ランタノイド
lanthanides
(レアアース金属)
(rare earth metals)

アクチノイド
actinides



現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

超新星爆発で作られた！

連星中性子星合体で作られた！

星の輪廻

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っ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、「できすぎた惑星」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。

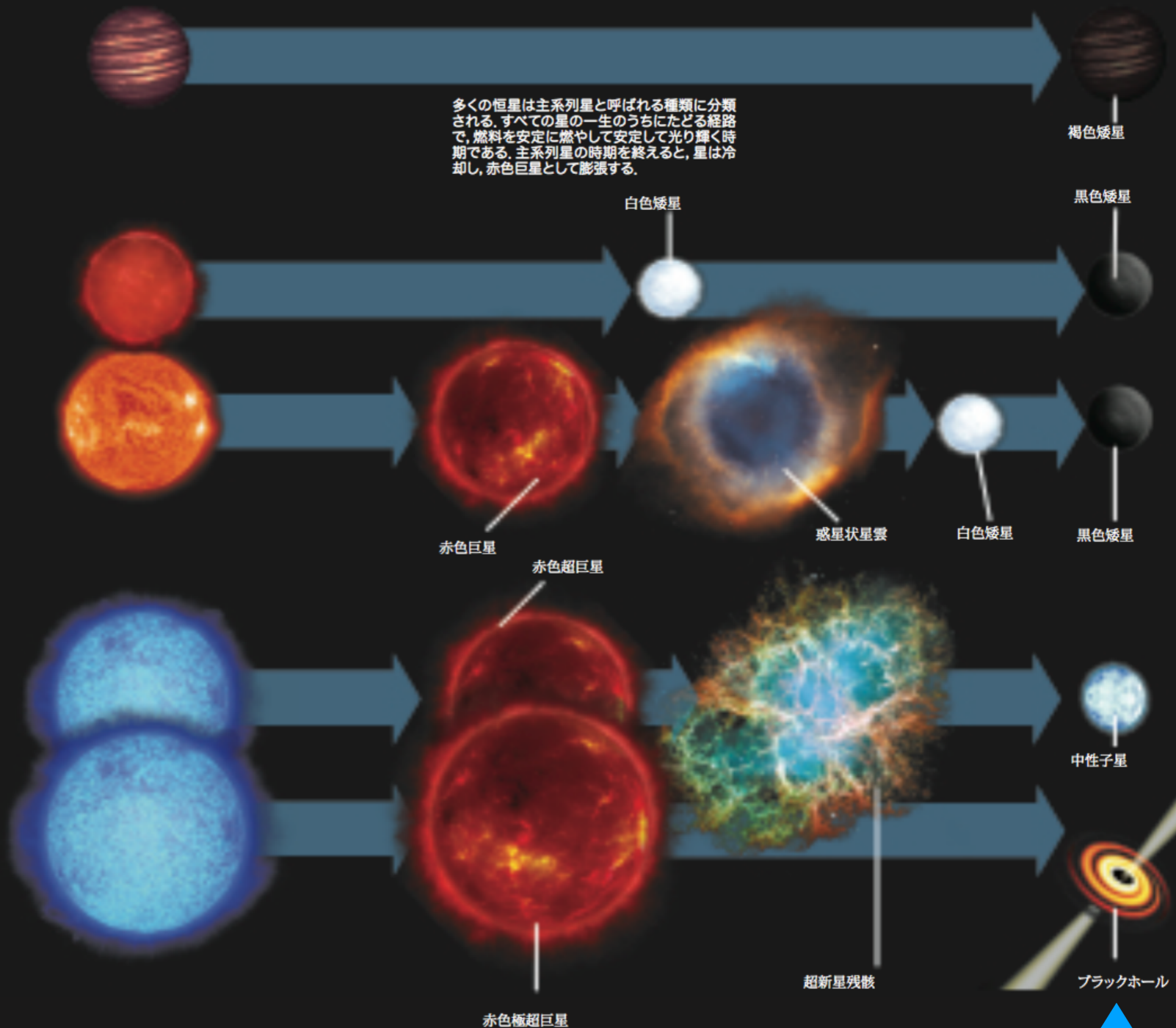
褐色矮星
質量：太陽の0.08倍
表面温度：1000°C
寿命(主系列)：不明

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



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

太陽質量の30倍以上の星が燃え尽きると、ブラックホールになる。

ブラックホールって何？

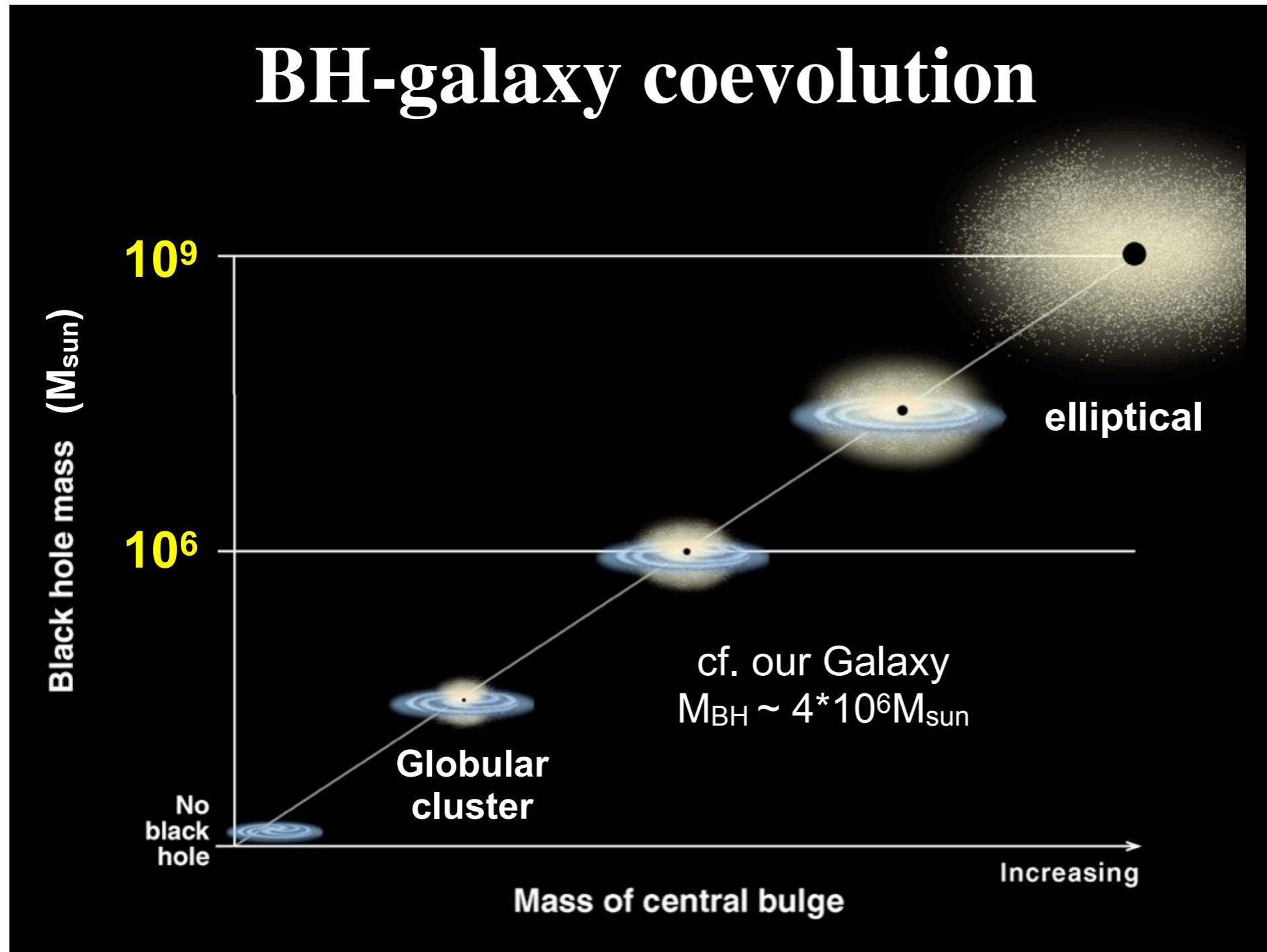
物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. ブラックホールはどうできた？
星の進化シナリオ
4. **未解決問題**
 - A. **銀河中心ブラックホールの形成**
 - B. 時空特異点の問題
 - C. 重力波観測で見つかった正体不明天体
 - D. 相対性理論はどこまで正しい理論か

銀河中心の超巨大ブラックホールはどうやってできたのか

super-massive BH

太陽質量の10-30倍のブラックホールの形成プロセスは説明できる。
でも、銀河中心にある太陽質量の数100万倍のブラックホールは??



銀河中心のブラックホールと、銀河は共に進化してきたはず

「共進化」
co-evolution

「宇宙生態系」
cosmic ecosystem

銀河中心の超巨大ブラックホールはどうやってできたのか

super-massive BH

太陽質量の10-30倍のブラックホールの形成プロセスは説明できる。
でも、銀河中心にある太陽質量の数100万倍のブラックホールは??



銀河中心のブラックホールと、銀河は共に進化してきたはず

「共進化」
co-evolution
「宇宙生態系」
cosmic ecosystem

「共進化」

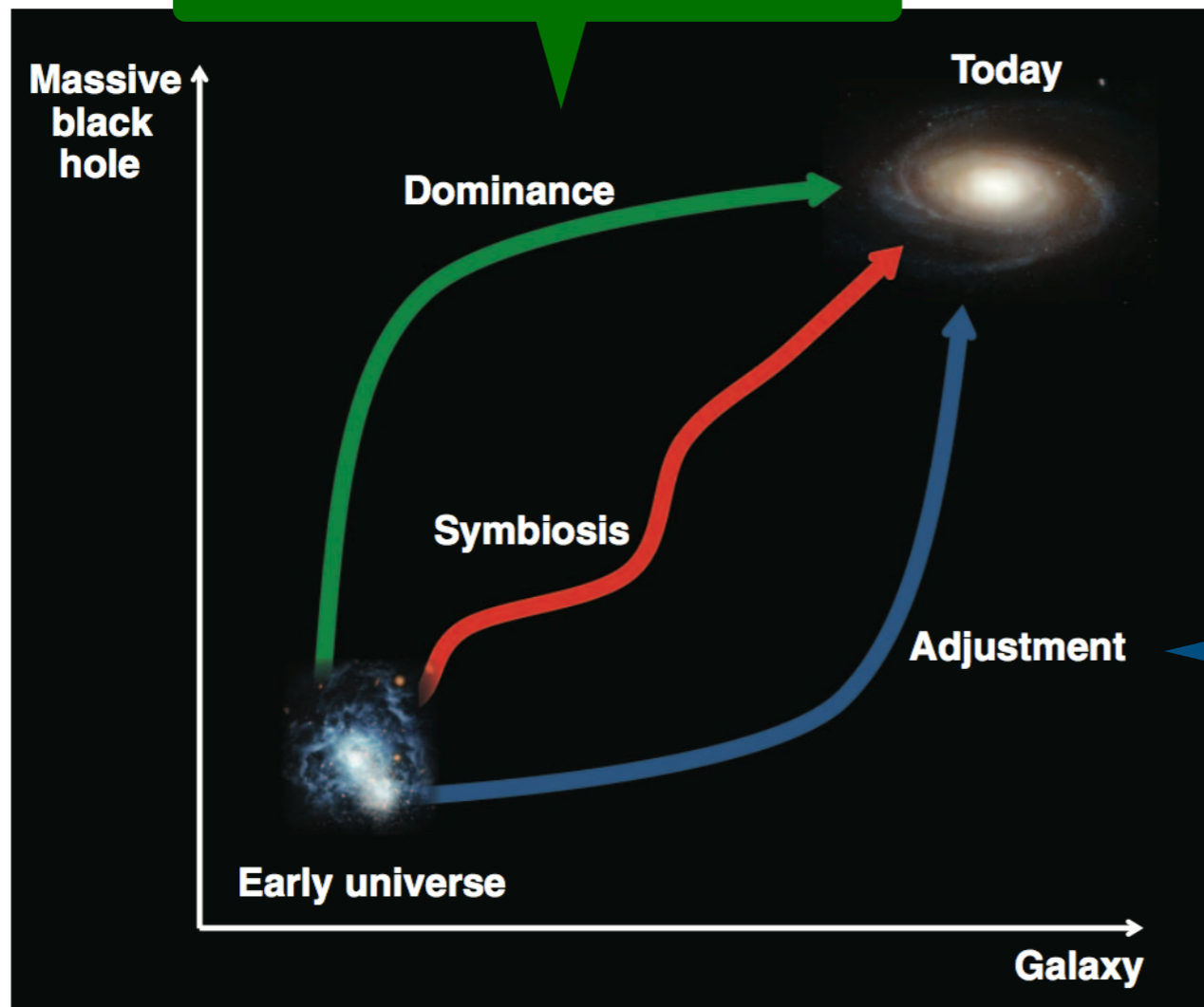
co-evolution

「宇宙生態系」

cosmic ecosystem

中心のBHが先にできて
銀河をつくった

はじめにできて
その後は？



銀河の中で、中心BHは
次第に成長した

合体形成の時間が
足りない？

Fig. 3. Possible routes to MBH and galaxy coevolution, starting from black holes forming in distant galaxies in the early universe. [Image credits: NASA, European Space Agency (ESA), A. Aloisi (Space Telescope Science Institute and ESA, Baltimore, MD), and The Hubble Heritage Team (Space Telescope Science Institute/ Association of Universities for Research in Astronomy)]

Volonteri, Science 337 (2012) 544

ブラックホールの未解決問題：超巨大ブラックホールの形成

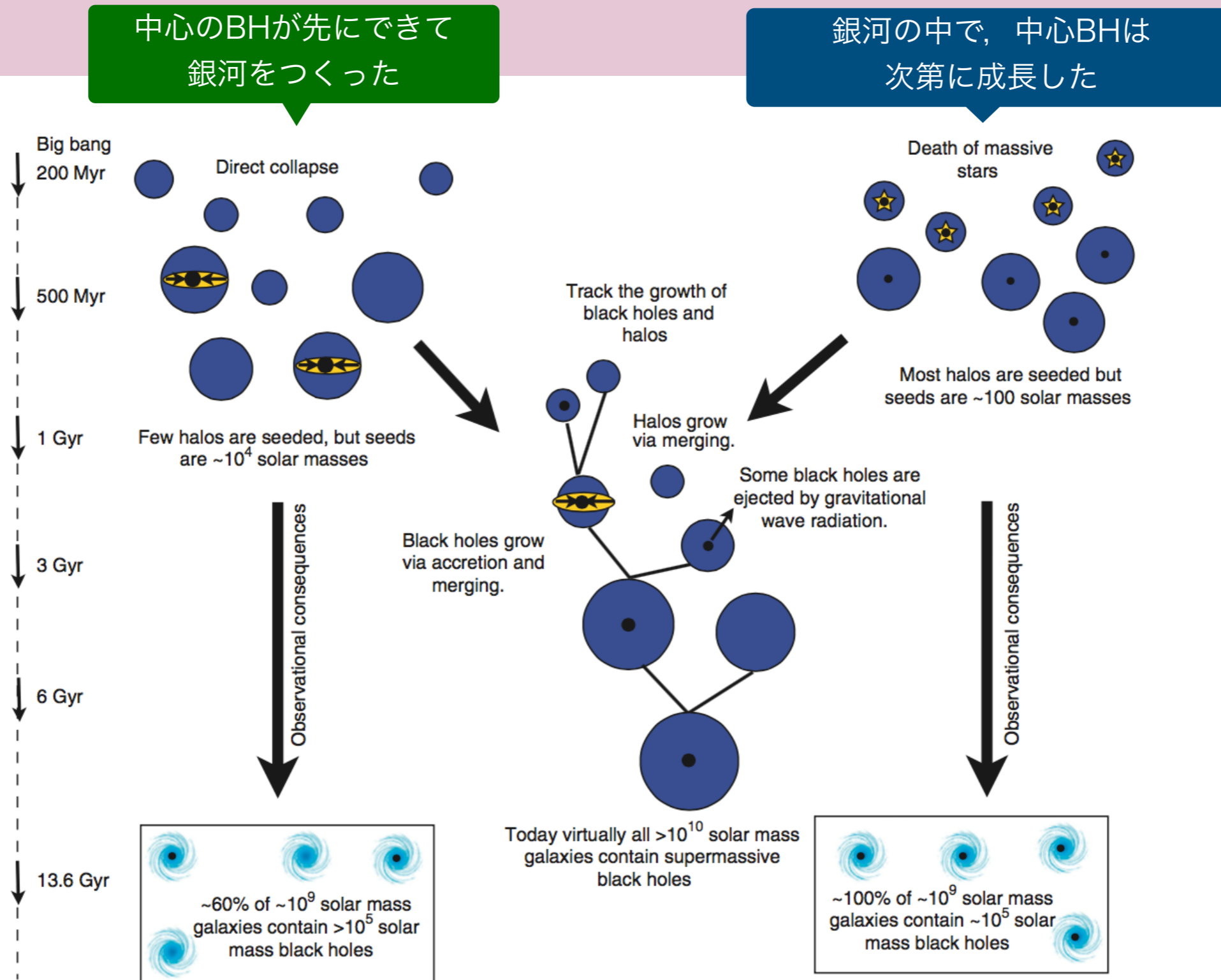
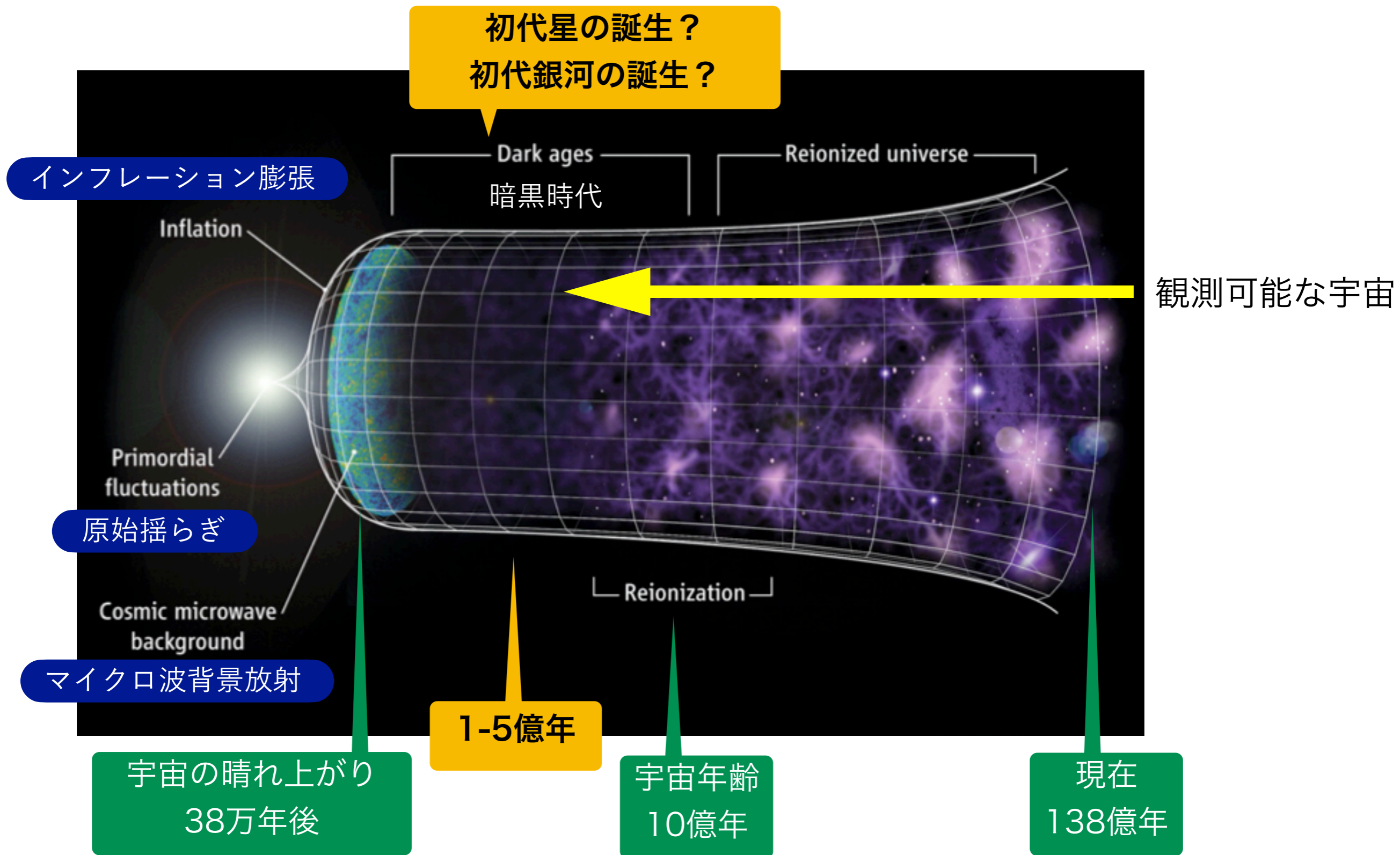


Figure 1 | Evolution of seed black holes. Schematic of the evolution of seed black holes assuming two different formation mechanisms (the death of the first generation of massive stars versus the direct collapse of gas into a black hole). Dark matter halos and the galaxies in them grow through merging. Black holes grow both via merging and by accreting gas. One additional complication is that after merging, gravitational radiation ‘recoil’ (see text for details) may send the black hole out of the galaxy. At present, we can distinguish between the two scenarios based on the fraction of small galaxies that contain massive black holes (we call this the ‘occupation fraction’).

宇宙の暗黒時代（ダーク・エイジ）



中間質量ブラックホール

100

10^5

M_{sun}

Stellar-mass BH

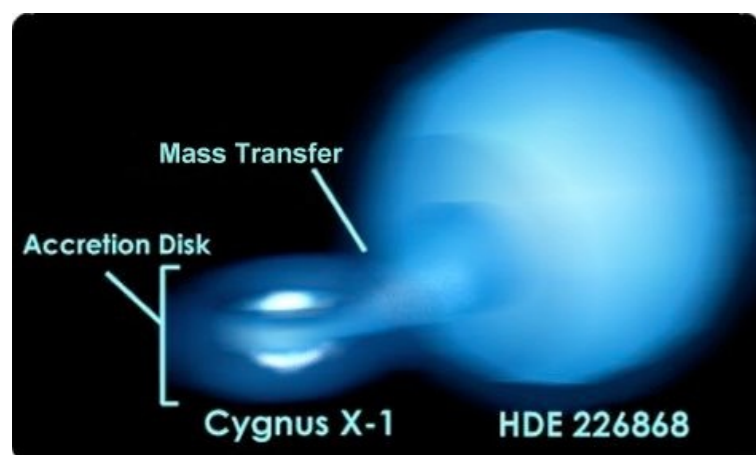
Intermediate-mass BH

Super-massive BH

星質量

中間質量？

超巨大質量



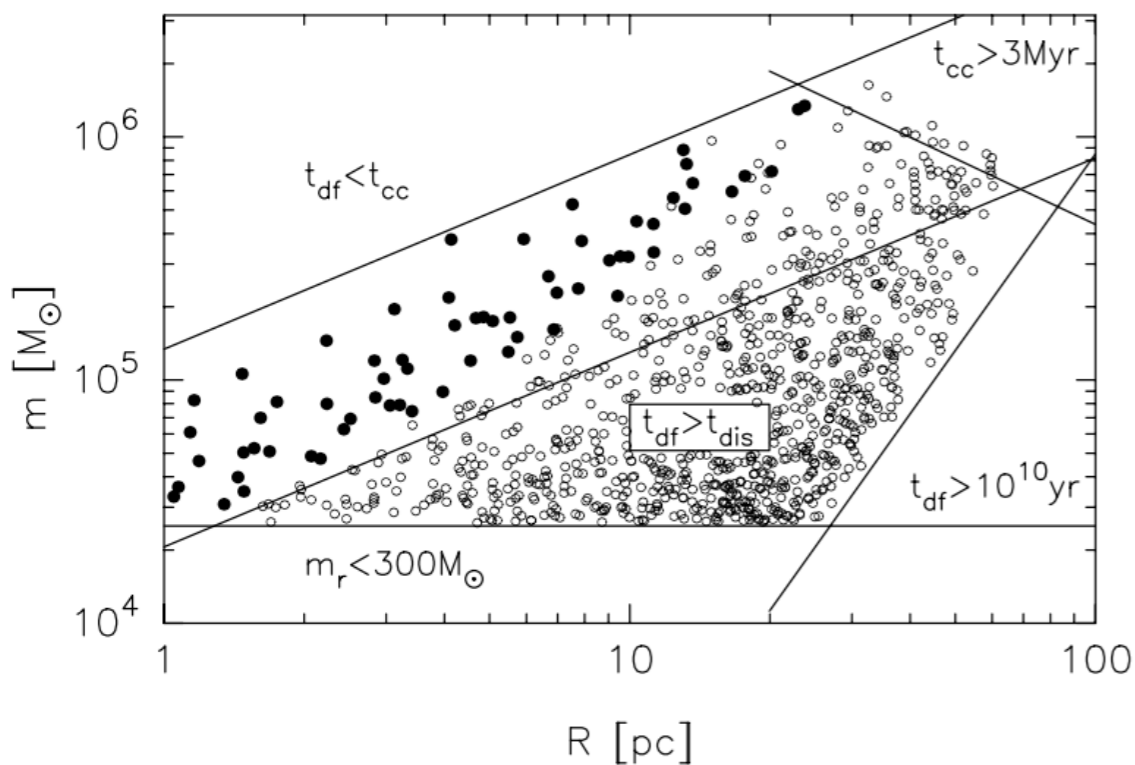
最近, 100-180 M_{sun}
のBHが重力波で見つかった

もう少し広い質量範囲でBHを
発見することが望まれる

M87 by EHT
質量 $6.5 \times 10^9 M_{\text{sun}}$
距離 5500万光年
16.9 Mpc

銀河中心には、多数の超巨大ブラックホールがある？

銀河のシミュレーションを行うと、銀河中心にはたくさんの超巨大ブラックホールが集まってくる = 力学的摩擦 (dynamical friction)



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 641:319–326, 2006 April 10
© 2006. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

THE ECOLOGY OF STAR CLUSTERS AND INTERMEDIATE-MASS BLACK HOLES IN THE GALACTIC BULGE

SIMON F. PORTEGIÉS ZWART,^{1,2} HOLGER BAUMGARDT,³ STEPHEN L. W. McMILLAN,⁴
JUNICHIRO MAKINO,⁵ PIET HUT,⁶ AND TOSHI EBISUZAKI⁷

Received 2005 November 11; accepted 2005 December 5

銀河中心には、多数の超巨大ブラックホールがある？

L7-1



Publ. Astron. Soc. Japan (2016) 68 (3), L7 (1–6)
doi: 10.1093/pasj/psw031
Advance Access Publication Date: 2016 April 19
Letter



天の川銀河中心に、
太陽質量の1万倍の天体を発見

Letter

Galactic center mini-spiral by ALMA: Possible origin of the central cluster

Masato Tsuboi,^{1,2,*} Yoshimi Kitamura,¹ Makoto Miyoshi,³ Kenta Uehara,²
Takahiro Tsutsumi,⁴ and Atsushi Miyazaki^{3,5}

arXiv:1602.05325

0.15 pc from SgrA*

$1-2 \times 10^4$ Msun

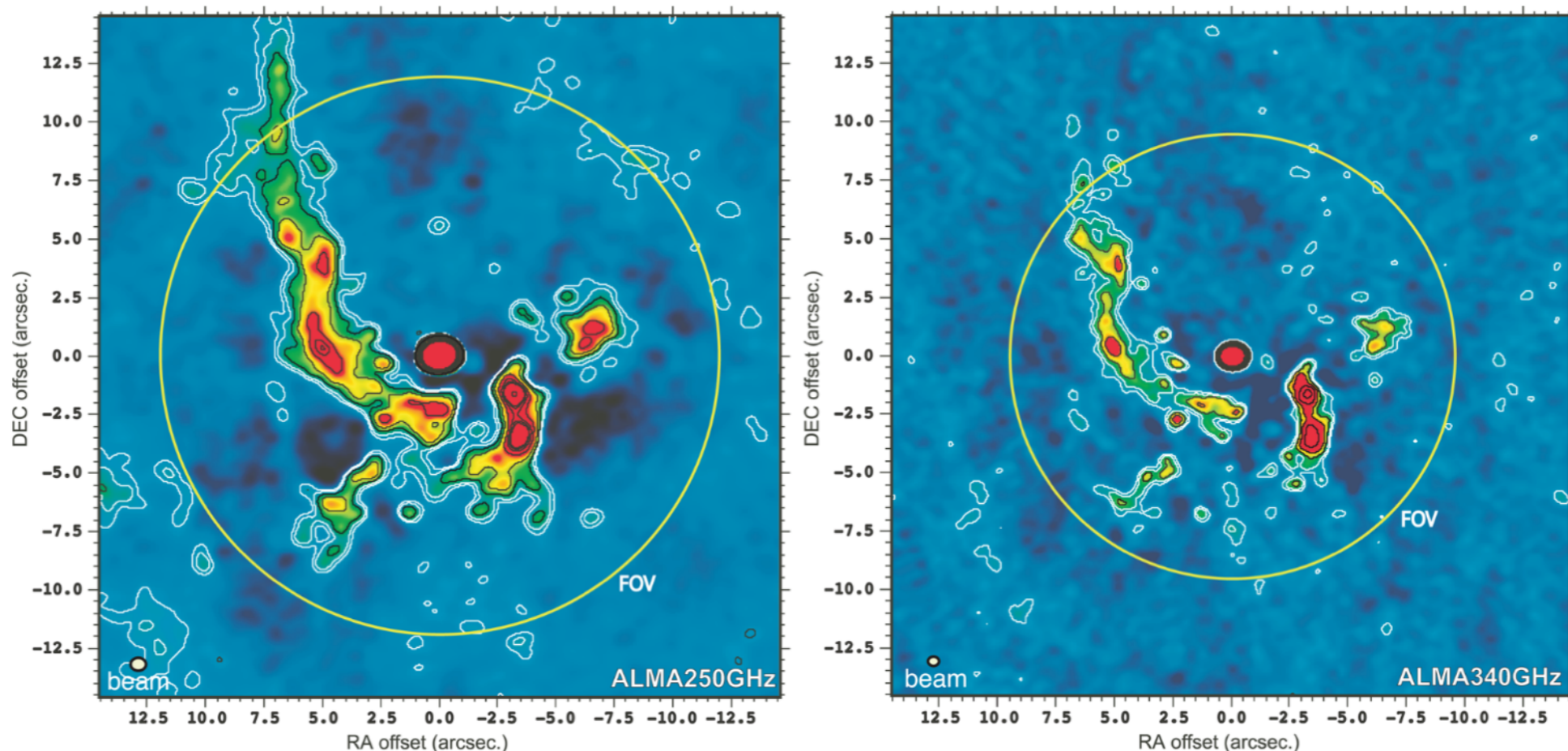


Fig. 2. Left panel: ALMA map in the 250 GHz band of the “mini-spiral” including Sgr A*. The four spectral windows of $f_c = 245, 247, 257,$ and 259 GHz are combined to improve the sensitivity. The diameter of the FOV is $24''$ (circle). The angular resolution is $0''.63 \times 0''.53$ at $PA = -84^\circ$, which is shown

銀河中心には、多数の超巨大ブラックホールがある？

天の川銀河で中質量ブラックホール候補の実体を初めて確認

2017年9月5日 | [研究成果](#)



中質量ブラックホールによる重力散乱でガス雲が加速される様子の想像図 [オリジナルサイズ \(5.0MB\)](#)

慶應義塾大学理工学部物理学の岡朋治（おかともはる）教授らの研究チームは、アルマ望遠鏡を使用して、天の川銀河の中心部分に発見された特異分子雲「CO-0.40-0.22」の詳細な電波観測を行いました。この特異分子雲は、天の川銀河中心核「いて座A*（エー・スター）」から約200光年離れた位置にあり、その異常に広い速度幅から内部に太陽の10万倍の質量をもつブラックホールが潜んでいる可能性が指摘されました。観測の結果、特異分子雲「CO-0.40-0.22」の中心近くに、コンパクトな高密度分子雲と点状電波

天の川銀河中心に、
太陽質量の10万倍の天体を発見

60pc from SgrA*
10⁵ Msun

nature
astronomy

Altmetric: 660

[More detail >>](#)

Letter

Millimetre-wave emission from an intermediate-mass black hole candidate in the Milky Way

Tomoharu Oka , Shiho Tsujimoto, Yuhei Iwata, Mariko Nomura & Shunya Takekawa

Nature Astronomy (2017)

doi:10.1038/s41550-017-0224-z

[Download Citation](#)

Received: 16 March 2017

Accepted: 14 July 2017

Published online: 04 September 2017

銀河中心には、多数の超巨大ブラックホールがある？

Science (2018 Jan 8)

NEWS | IN DEPTH

ASTRONOMY

Middleweight black holes found at last

Discovery could explain the origin of million-solar-mass monsters at galactic centers

By Daniel Clery

How did giant black holes grow so big? Astronomers have long had evidence of baby black holes with masses of no more than tens of suns, and of million- or billion-solar-mass behemoths lurking at the centers of galaxies. But middle-size ones, with thousands or tens of thousands of solar masses, seemed to be missing. Their absence forced theorists to propose that supermassive black holes didn't grow gradually by slowly consuming matter, but somehow emerged as ready-made giants.

Now, astronomers appear to have located some missing middleweights. An international team has scoured an archive of galaxy spectra and found more than 300 small galaxies that have the signature of intermediate mass black holes (IMBHs) in their cores. The team confirmed that 10 of those candidates really do have middleweight black holes by consulting other data sets, raising their confidence that the original list "must include at least a few dozen genuine [IMBHs]," says team leader Igor Chilingarian of the Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, Massachusetts.

Ezequiel Treister of the Pontifical Catholic University of Chile in Santiago salutes the work. "Black hole measurements are really hard; we've been trying to do this for many years." Volker Bromm of the University of Texas in Austin says the team's technique is "pretty original" and calls their work "careful and responsible." The findings, researchers say, could begin to unravel the mystery of supermassive black hole formation.

Black holes of any size are hard to find because they don't emit light of their own. They can reveal themselves by sucking in nearby gas and dust, heating it so fiercely along the way that it emits x-rays. X-rays pouring from the centers of many galaxies betray the presence of supermassive black holes, known as active galactic nuclei (AGNs). But x-rays from an IMBH would be much fainter, and existing x-ray satellites are geared toward detailed observations of distant sources, not wide-ranging surveys of multiple galaxies. The archive from NASA's Chandra X-ray Observa-

tory, for example, only covers 2.5% of the sky. So Chilingarian's team searched for an alternative, visible-light signal in a catalog of 930,000 galaxy spectra from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). The x-rays produced by an AGN ionize clouds of hydrogen gas in the galactic bulge around it, setting them aglow at particular frequencies that produce distinct peaks in the galaxy's spectrum. The clouds closest to the black hole swirl around it at high speed, which shifts the frequencies via the Doppler effect and smears out each peak. Gas clouds farther out move more slowly, so the peaks remain sharp. To identify galaxies that have a small AGN, the team looked for spectral peaks that were sharp at the top but smeared out around the base.

That is enough to challenge recent thinking about how supermassive black holes formed. Theorists needed alternatives to gradual growth not just because IMBHs were missing, but also because astronomers have identified giant quasars—very luminous AGNs—shining when the universe was less than a billion years old. "How could very massive black holes grow so big [so early]?" asks theorist Avi Loeb of Harvard University. He and others proposed that in the early universe, huge gas clouds collapsed directly into black holes of between 100,000 and 1 million solar masses, which formed the seeds of the early quasars. That scenario would explain the rapid formation and the lack of IMBHs.

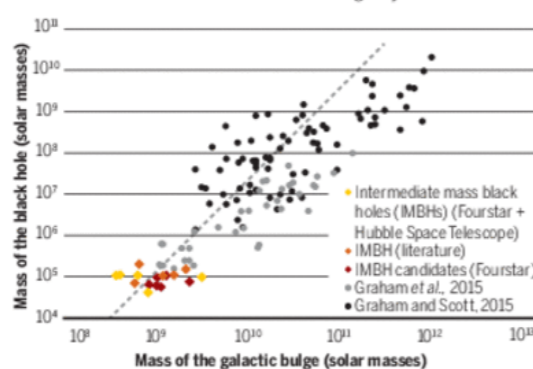
The new result suggests, however, that at least some giant black holes grew from smaller seeds. The 10 confirmed IMBHs fit a pattern of gradual growth: Their masses correlate with the size of galactic bulge around them, suggesting each is growing in step with its host (see diagram, left). "There is not one scenario: both happen," Treister says. "Now, the question is, which is more common?"

Bromm says direct collapse might only have been possible in the very early universe. The big bang generated only hydrogen and helium; heavier elements, forged by early stars, did not join the mix for millions of years. They helped cool the primordial gas when they became ionized, causing it to glow and shed heat. A cooler gas cloud is more likely to fragment into many stars—the seeds of small black holes. In contrast, a hot primordial cloud could collapse into a single giant object, with help from the gravitational pull of dark matter, Bromm suggests. It would be a rare occurrence, he admits, something of a "cosmic miracle."

The only way to find out which scenario dominates is to find more middleweights. The hurdle, Chilingarian says, is the lack of x-ray surveys. A German-built x-ray survey telescope called eROSITA is expected to be launched later this year or early next year on board the Russian observatory Spektr-RG. "It'll produce a very nice data set," Chilingarian says. He's betting it will yield hundreds more confirmed IMBHs—and shed more light on black hole origins. ■

Black hole growth chart

Black holes, including the newly discovered middleweights (color), have masses that correlate with the size of their host galaxy.

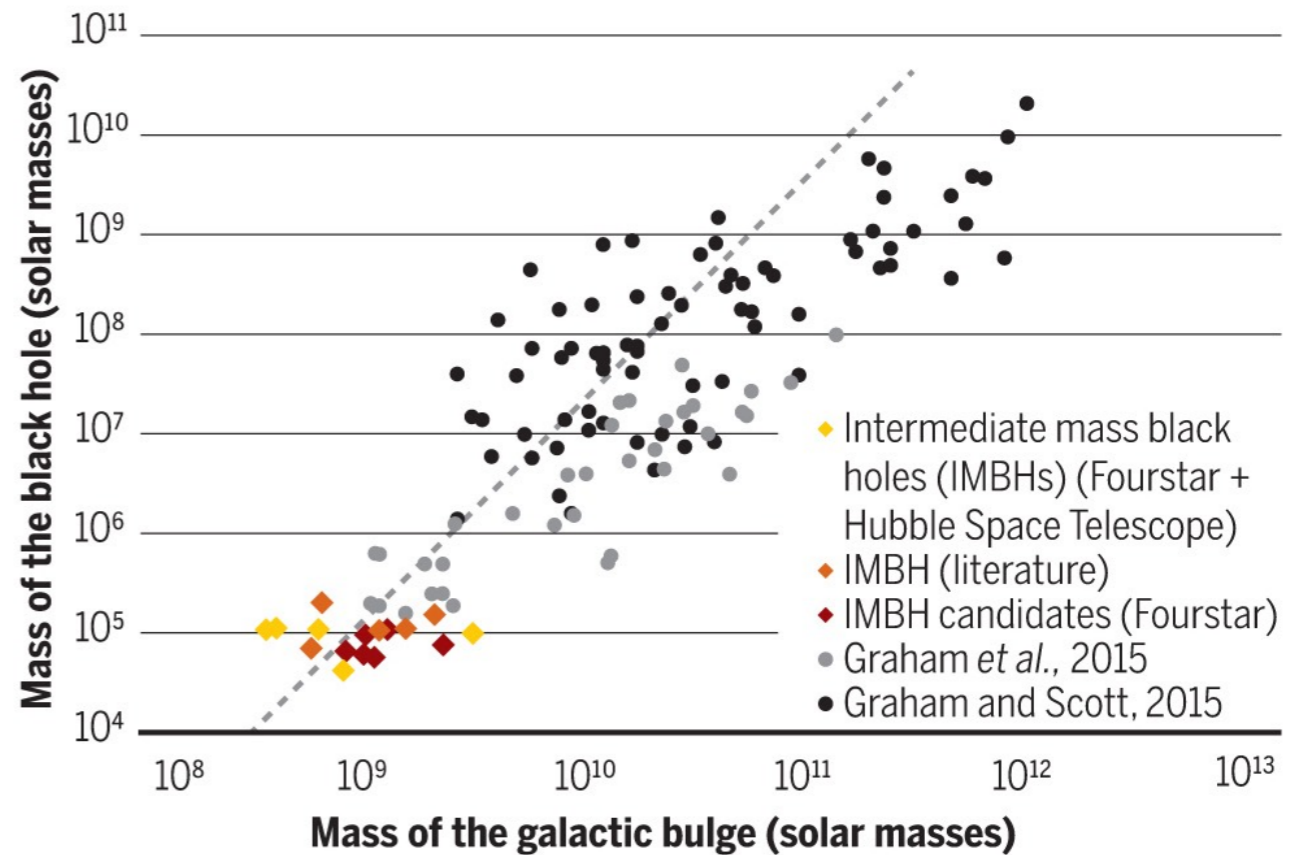


The search of the SDSS catalog yielded 305 candidates. Because other short-lived phenomena could mimic the key signal, the team checked other surveys, gathered at different times, to be sure the candidate galaxies showed the same smeared peaks. They also inspected some of the galaxies with the Giant Magellan Telescope in Chile. But the real clincher of an AGN is the telltale x-ray signal, so the team searched archived observations from NASA's Chandra and Swift satellites and Europe's X-ray Multi-Mirror Mission to see whether, by chance, they had observed any of those candidates. The result was a final short list of 10, the team reports in a paper posted on arXiv and submitted to *The Astrophysical Journal*.

中間質量ブラックホール ついに見つかる

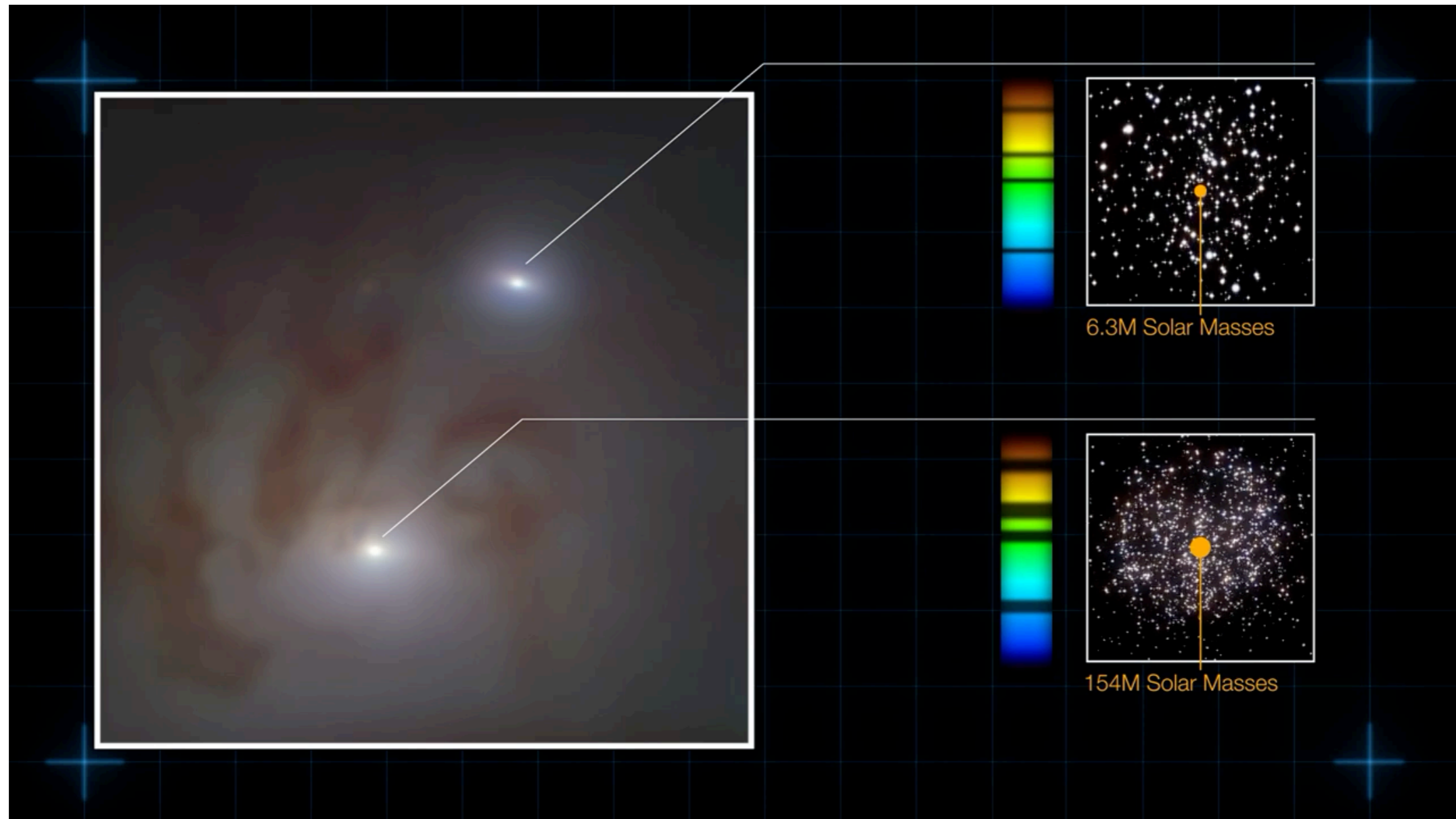
Black hole growth chart

Black holes, including the newly discovered middleweights (color), have masses that correlate with the size of their host galaxy.



GRAPH: CHILINGARIAN ET AL., ARXIV:1805.04621 (2018); ADAPTED BY A. CUORINA/SCIENCE

NGC7727の銀河に，超巨大ブラックホールのペア発見



8900万光年先の銀河NGC7727に，太陽質量の1億5400万倍のBHと630万倍のBHが近接して存在している．それぞれの周囲の星の動く速さから測定．アニメーション表示．
欧州南天天文台発表．

<https://www.youtube.com/watch?v=HnHZY9Py51l>

<https://www.eso.org/public/videos/eso2117c/>

ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. ブラックホールはどうできた？
星の進化シナリオ
4. **未解決問題**
 - A. 銀河中心ブラックホールの形成
 - B. **時空特異点の問題**
 - C. 重力波観測で見つかった正体不明天体
 - D. 相対性理論はどこまで正しい理論か

2020年のノーベル物理学賞 受賞者

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

“ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大

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

ラインハルト・ゲンツェル (68) 独マックスプランク研究所

アンドレア・ゲズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



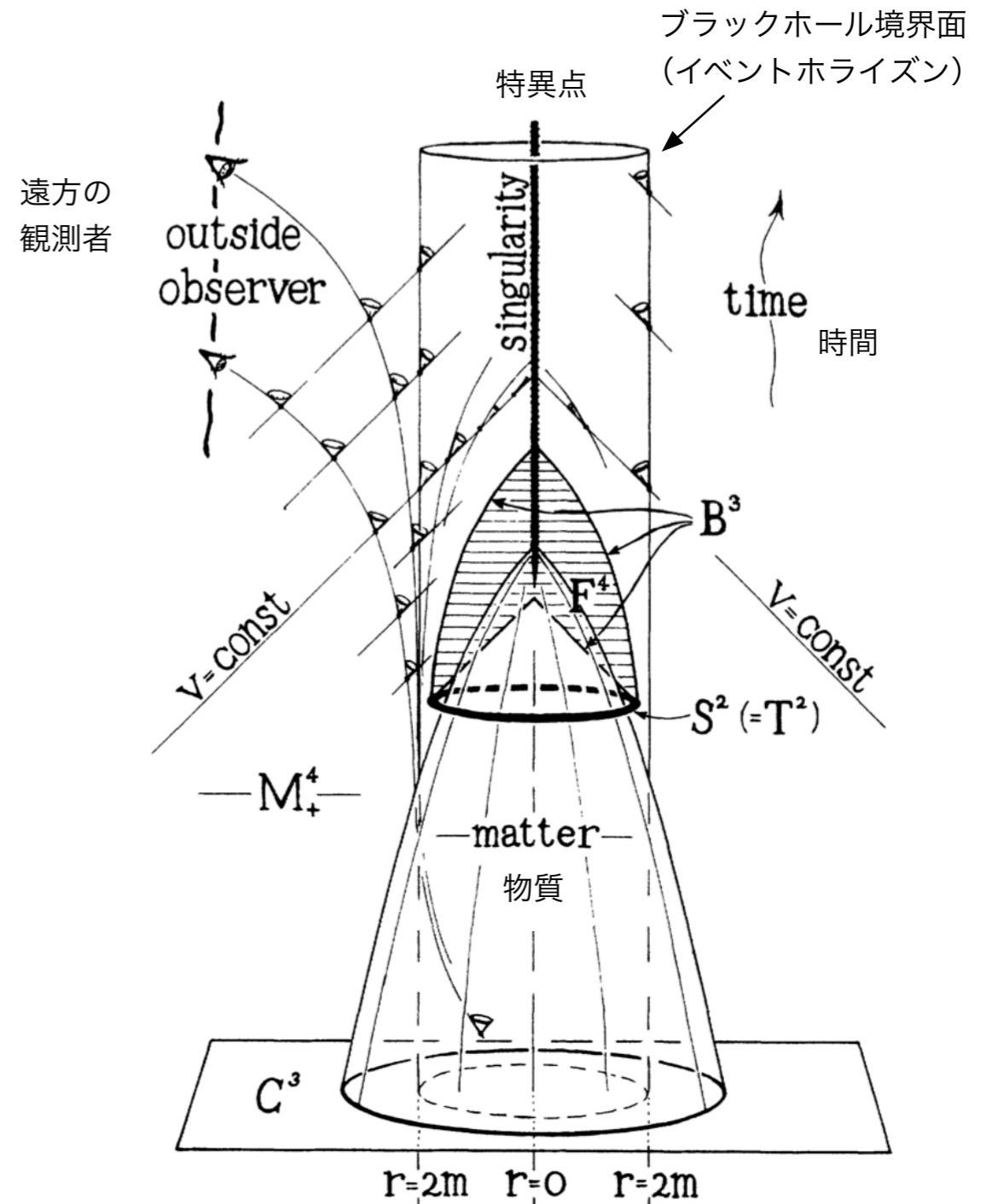
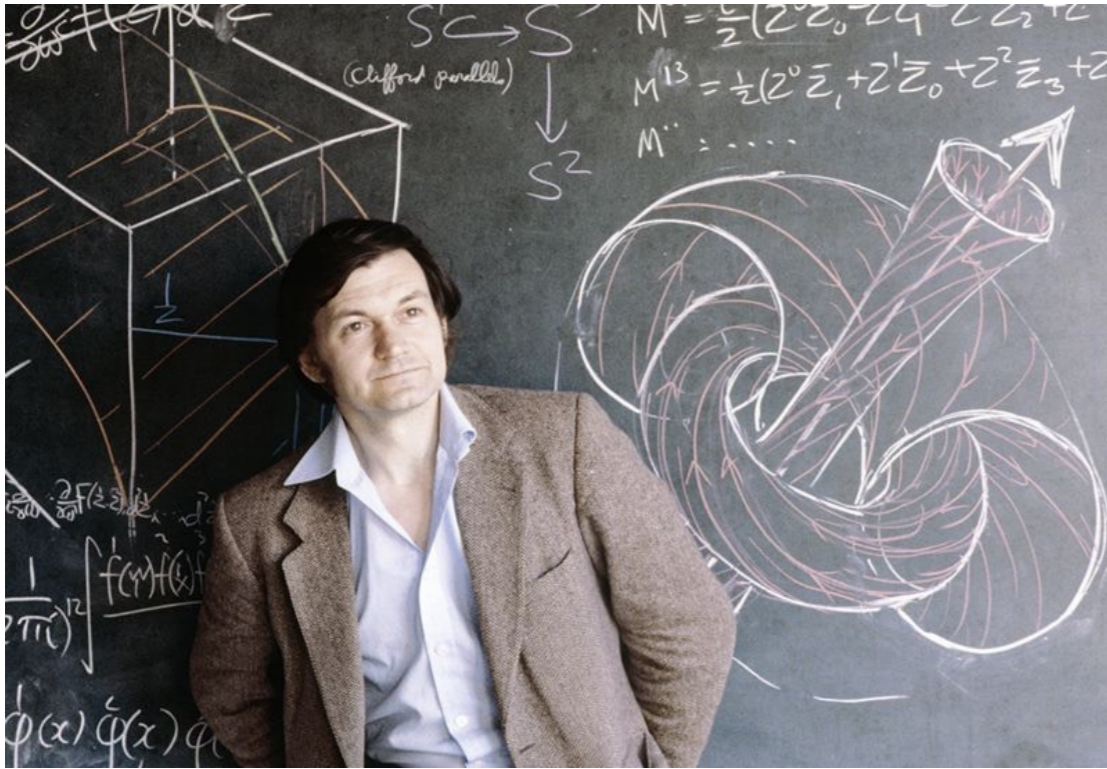
Roger Penrose “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”

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



ロジャー・ペンローズ

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

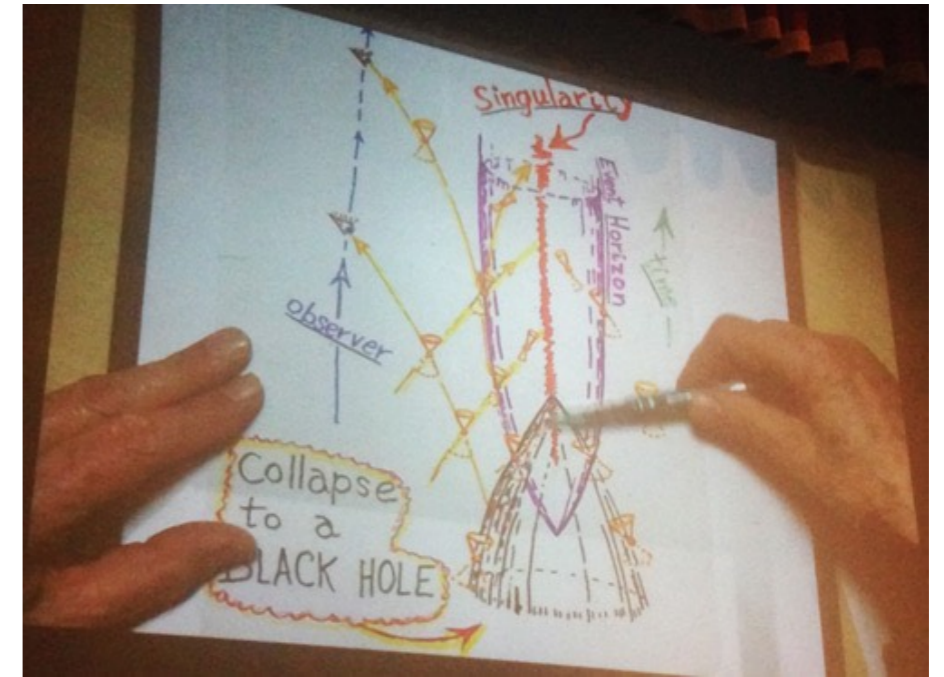
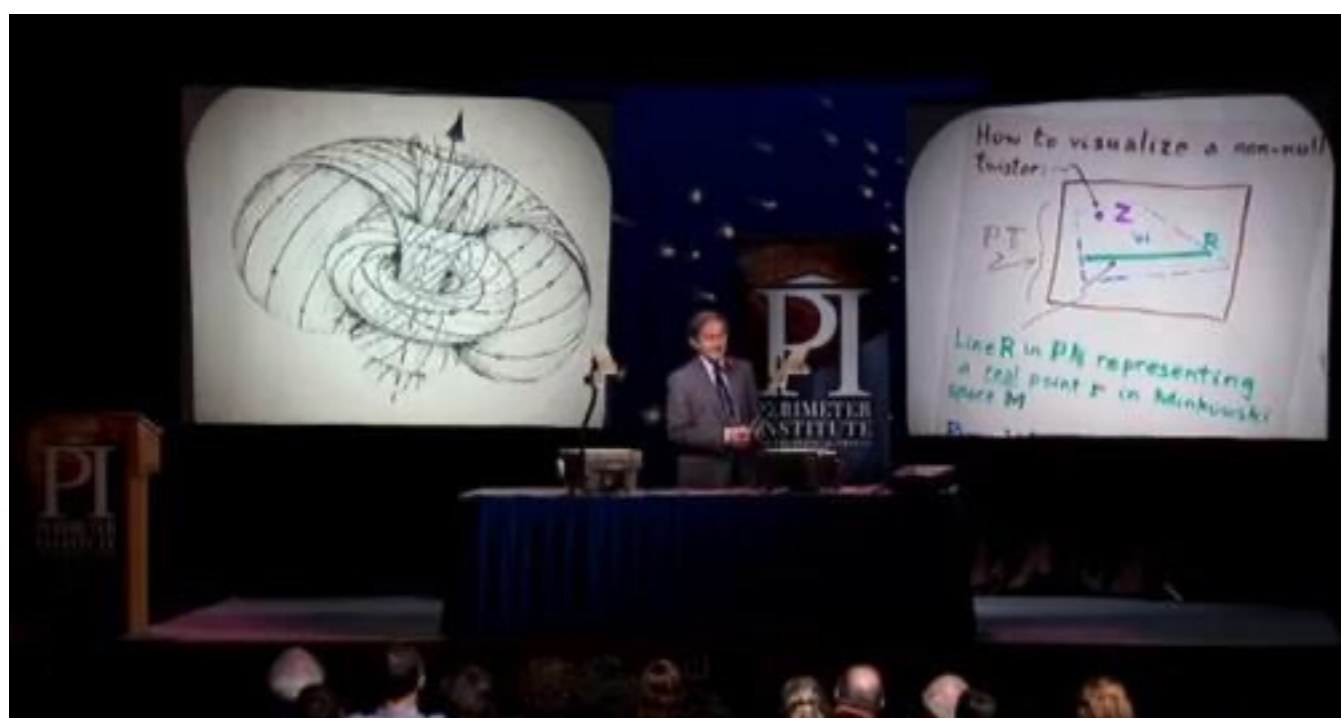
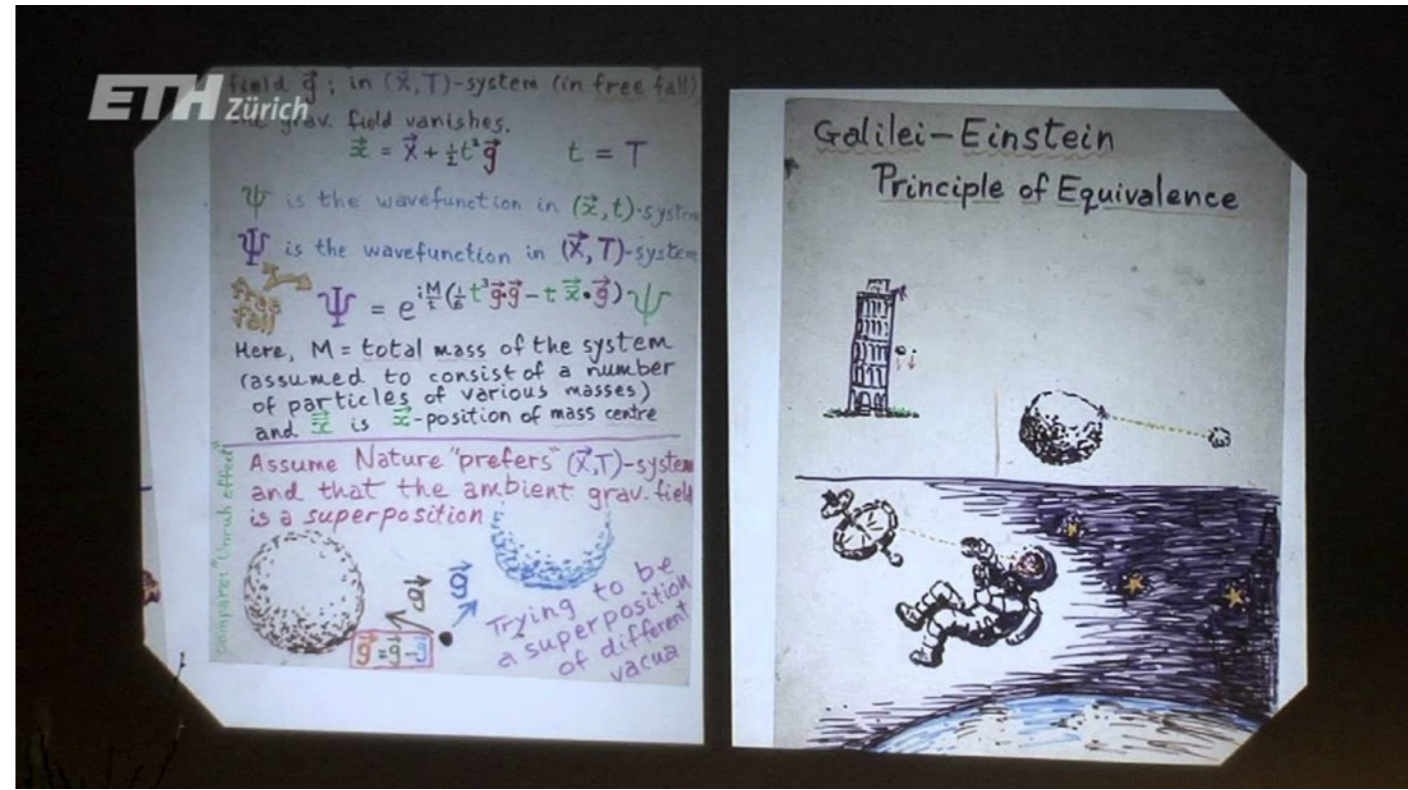
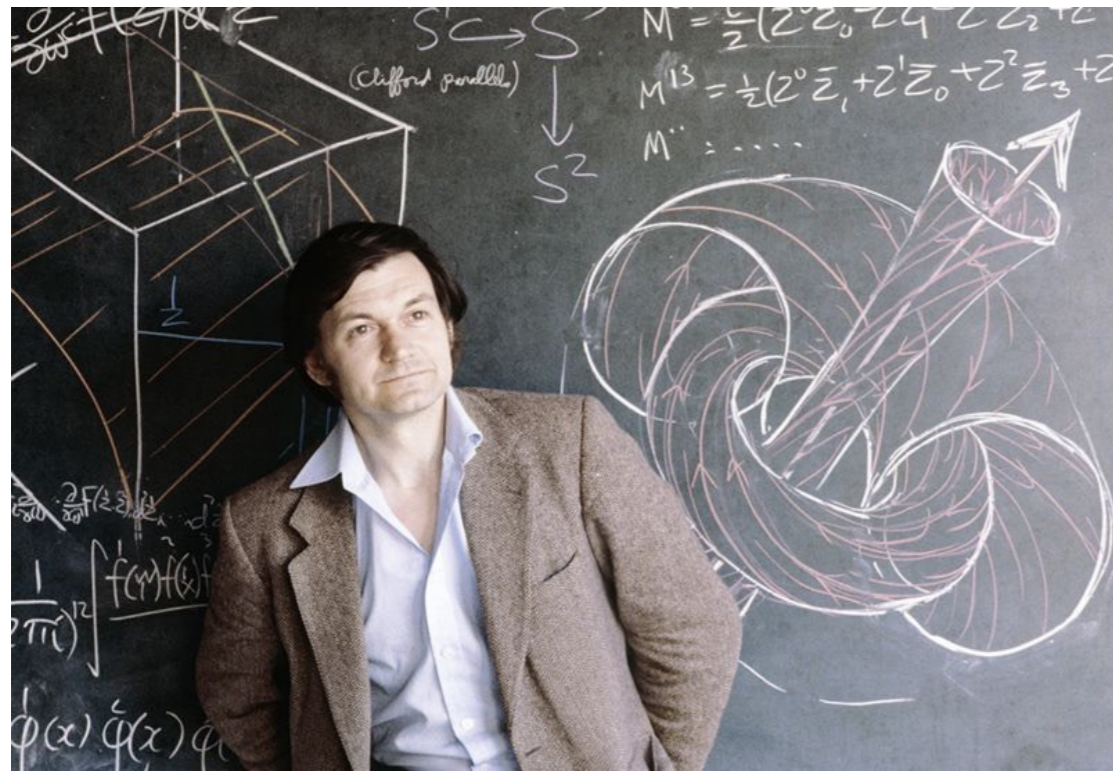


ペンローズが描いたブラックホール形成の図。横の広がりが空間（2次元で表している）、縦方向上向きに時間の進みを表す。物質が重力崩壊してつぶれ、光（円錐で描かれているのが光の広がり方を示す）が遠方へ到達しない領域が出現する。中心では特異点が発生するが、それはブラックホール境界面の内側にあるので、遠方の物理を乱さない。

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

ロジャー・ペンローズ

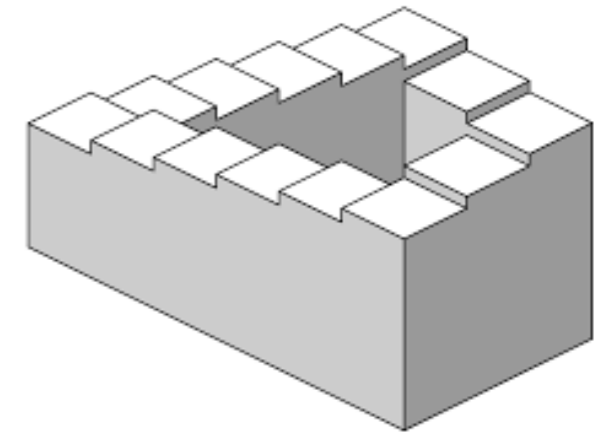
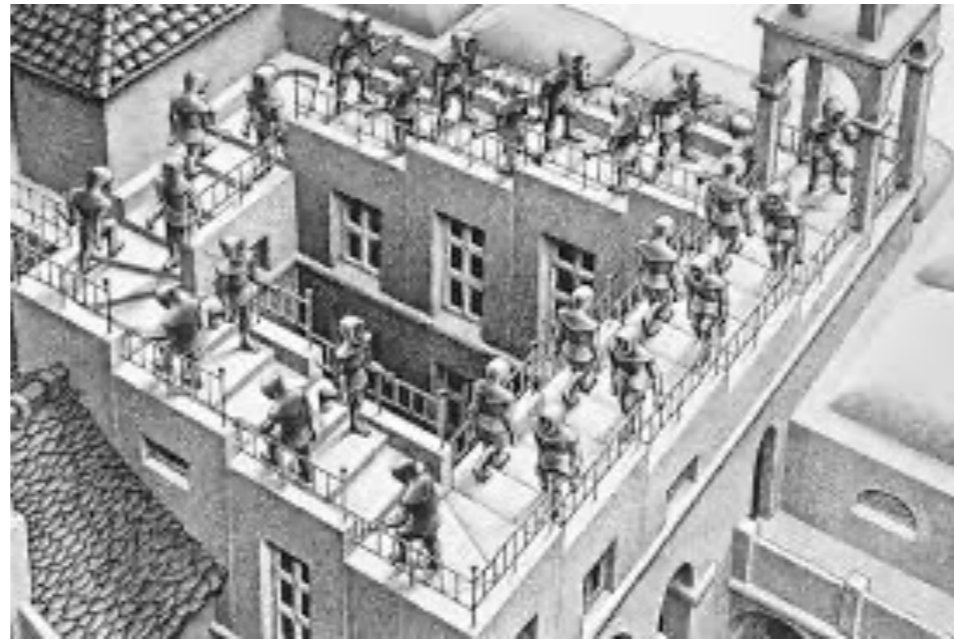
「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」



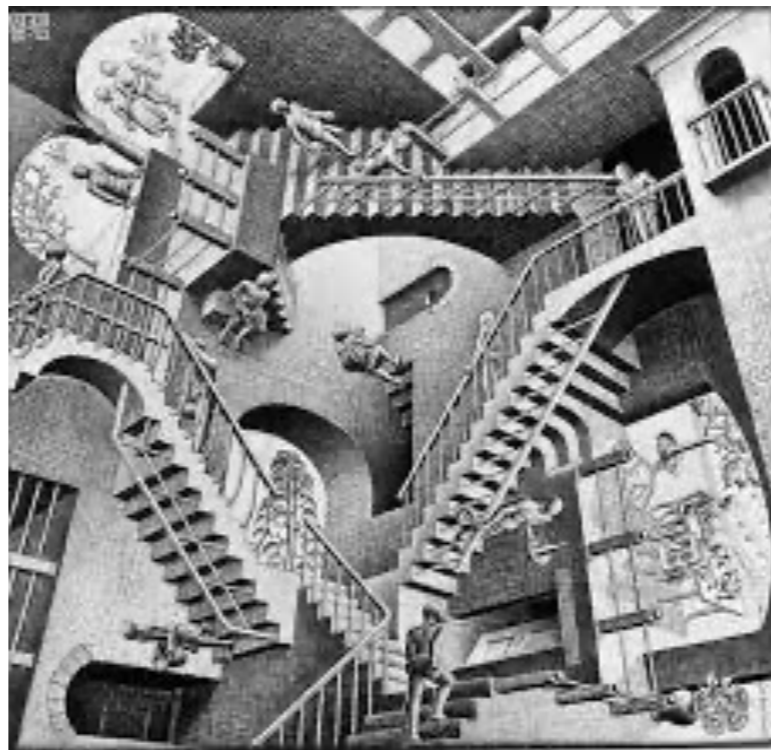
ロジャー・ペンローズ & M. C. エッシャー



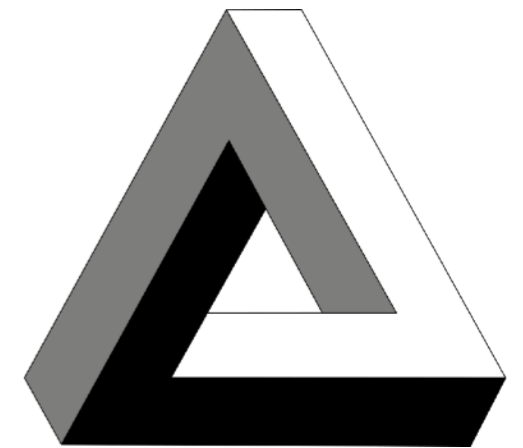
Ascending and Descending by M. C. Escher



Penrose Stairs

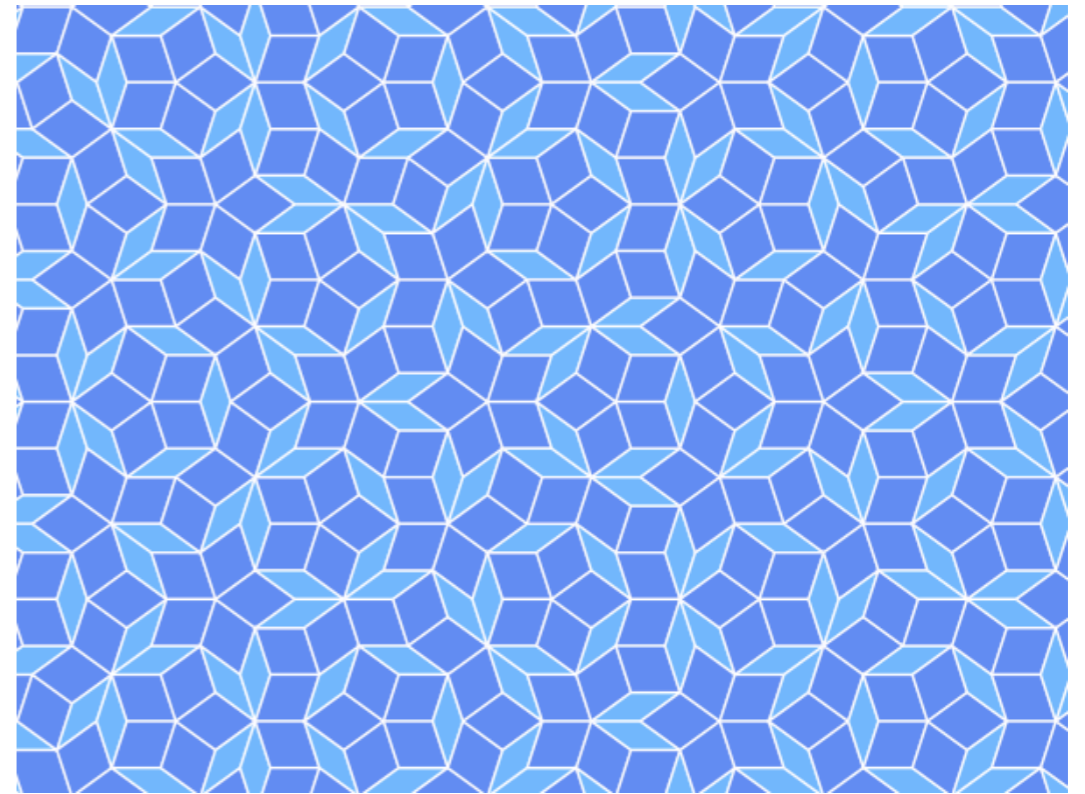
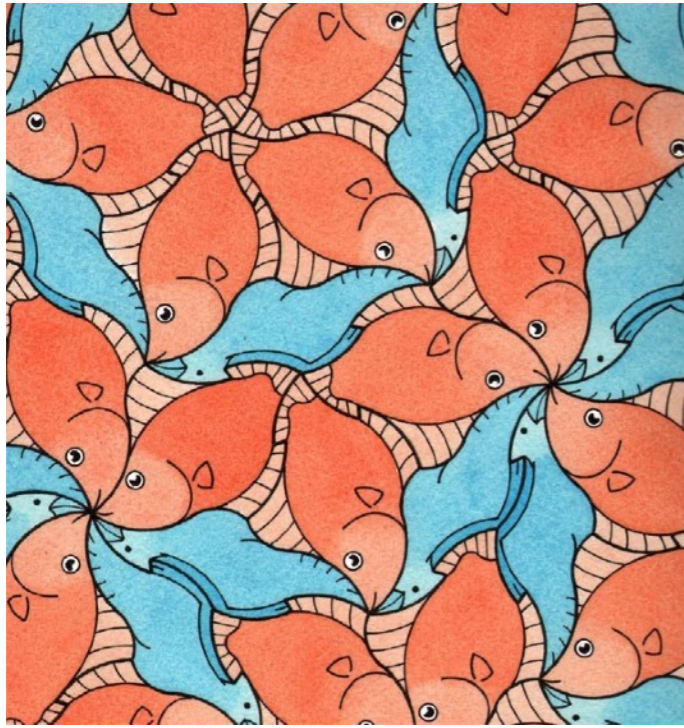


Relativity (1953) by M. C. Escher



Penrose Triangle

ロジャー・ペンローズ & M. C. エッシャー



Penrose Tiling



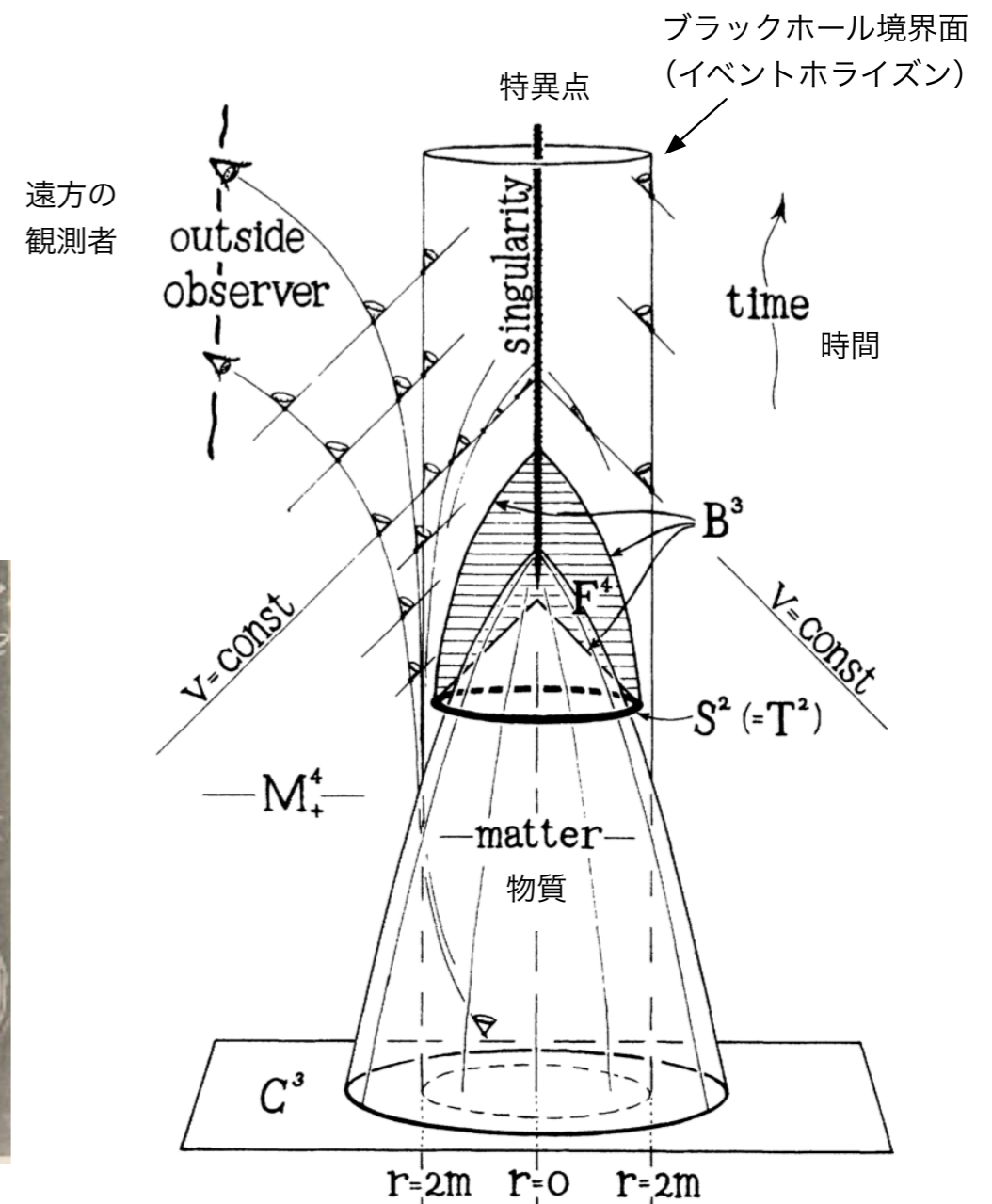
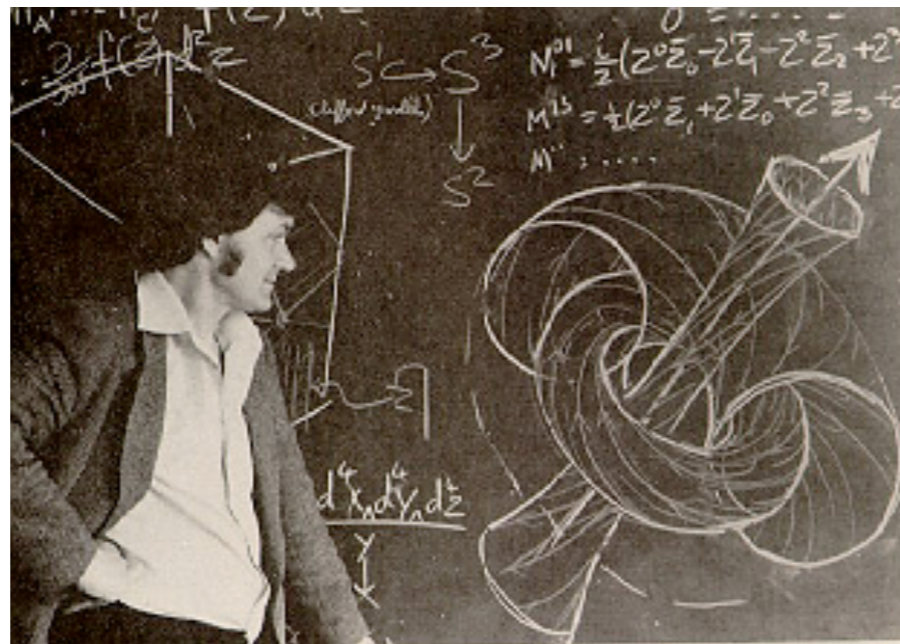
時空特異点の問題

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

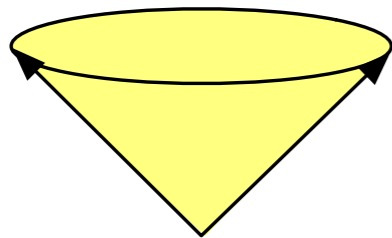
星が重力崩壊すれば、必ず特異点
が形成される。



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)**

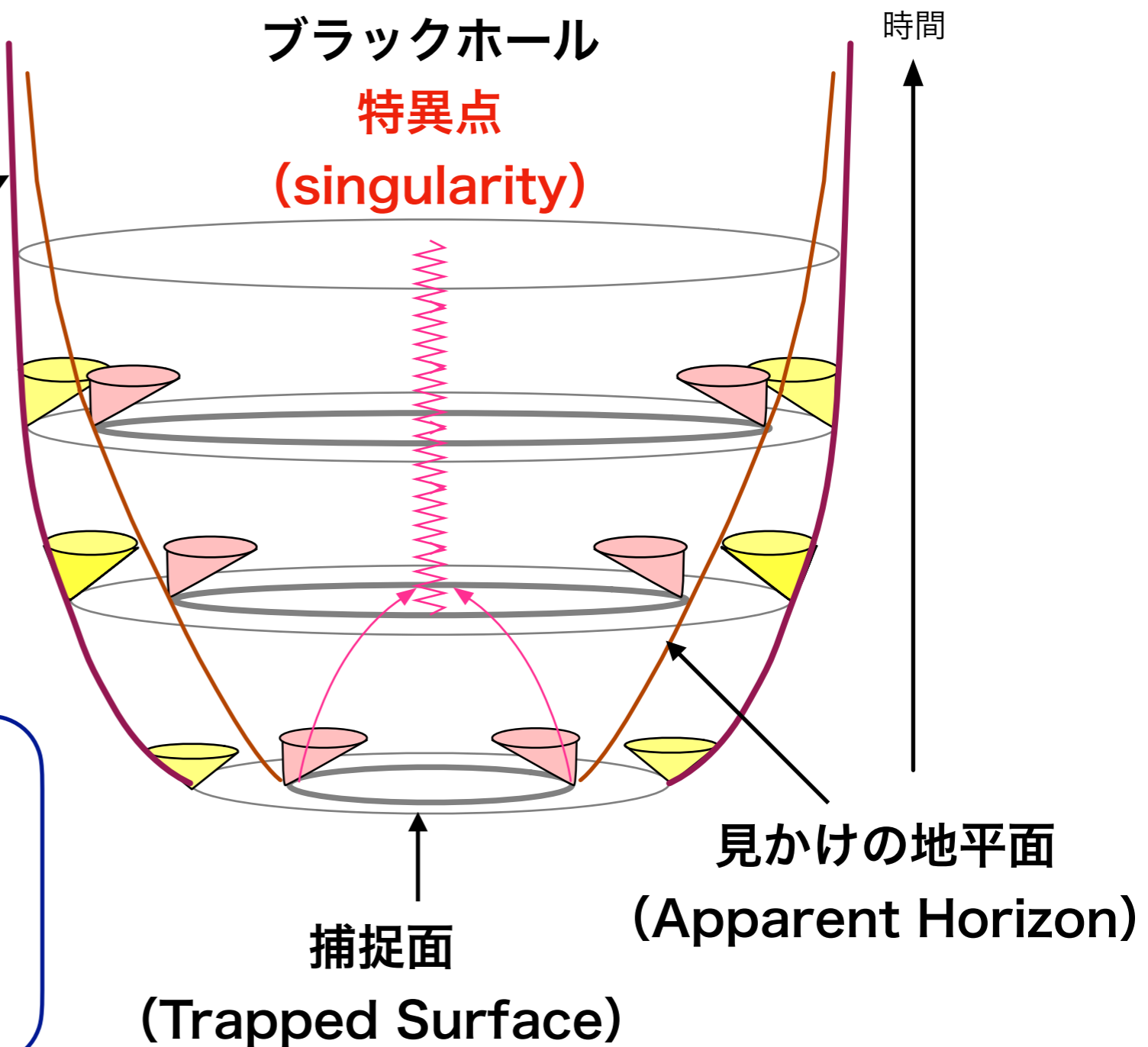
光円錐(light cone)



事象の地平面
(Event Horizon)

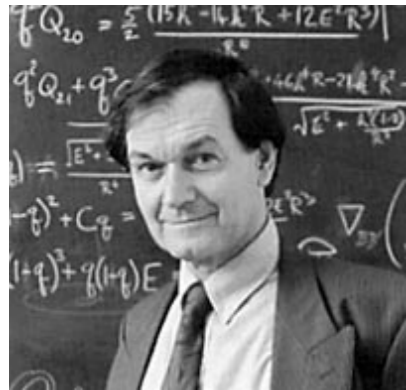
大域的に双曲的な漸近平坦時空において、光的エネルギー条件が成立すれば、**捕捉面はブラックホール内部に含まれる**

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)

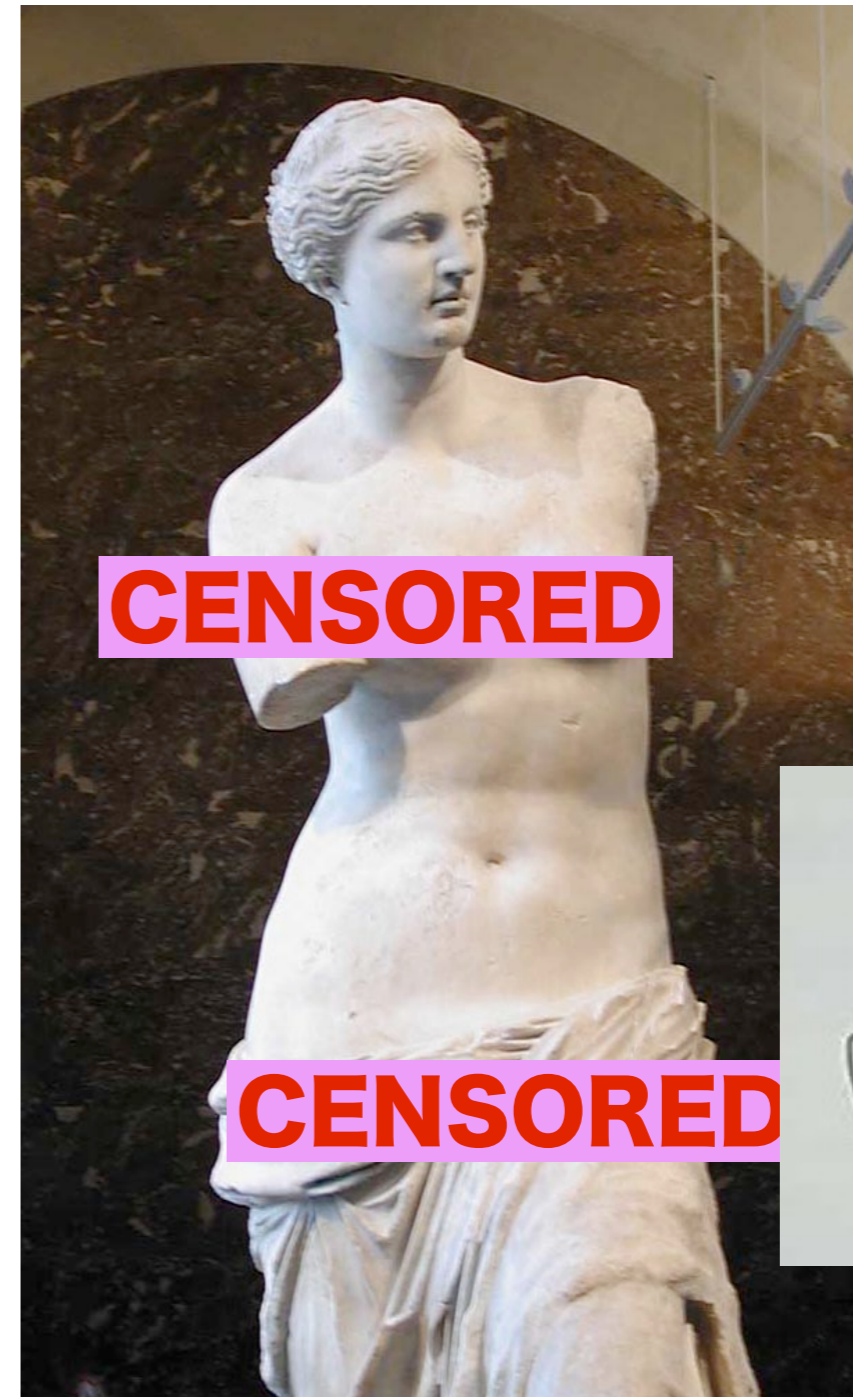
適切なエネルギー条件をみたす漸近平坦時空では，重力崩壊によって発生するすべての特異点は，ブラックホールの事象の地平面に覆われる。

「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。

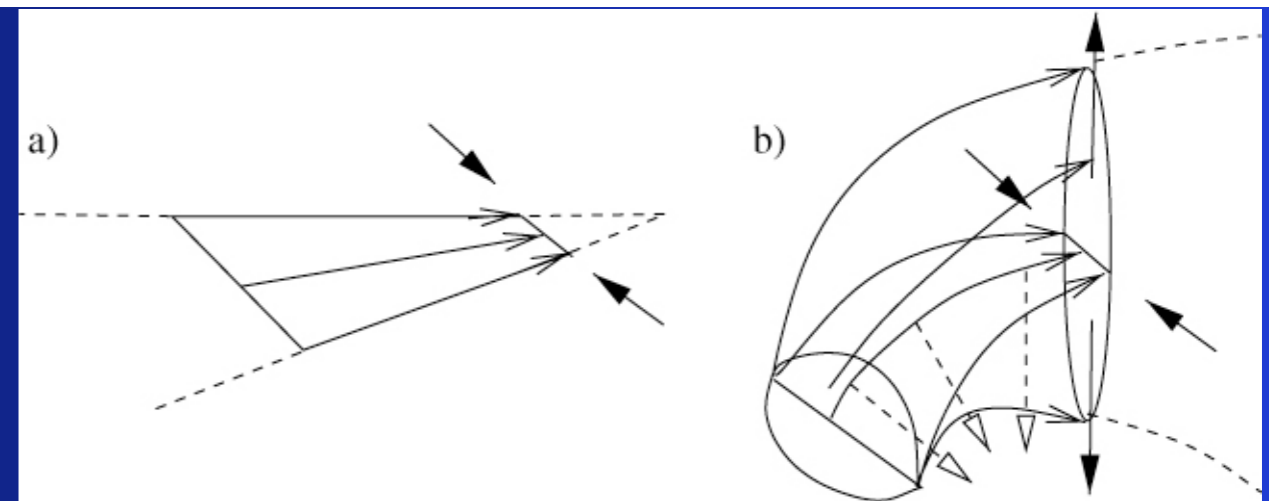
「裸の特異点は，存在しない」



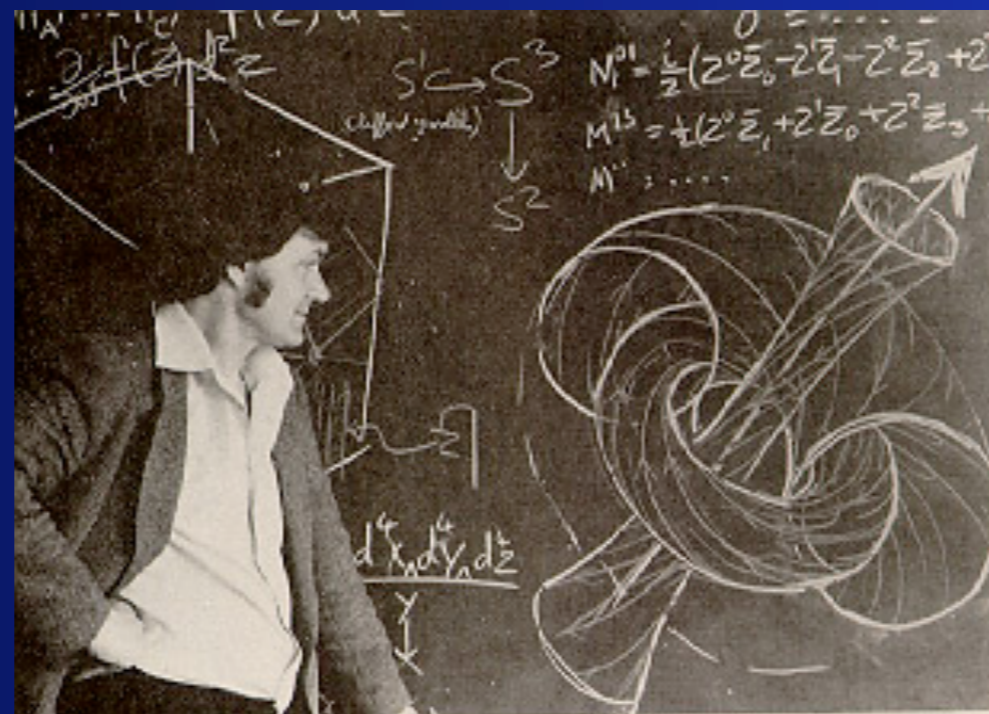
特異点定理

特異点定理 (singularity theorem)

一般相対性理論の方程式の解には、真空や普通の物質を考える限り、必ず特異点が存在する



<http://iopscience.iop.org/1475-7516/2005/10/017>

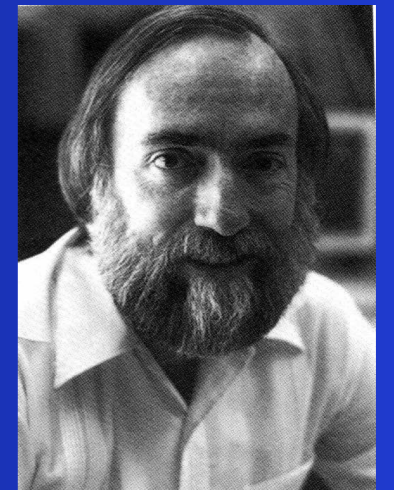


ホーキングとソーンの賭け



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

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.



John P. Preskill Kip S. Thorne

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

1991年9月24日

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.

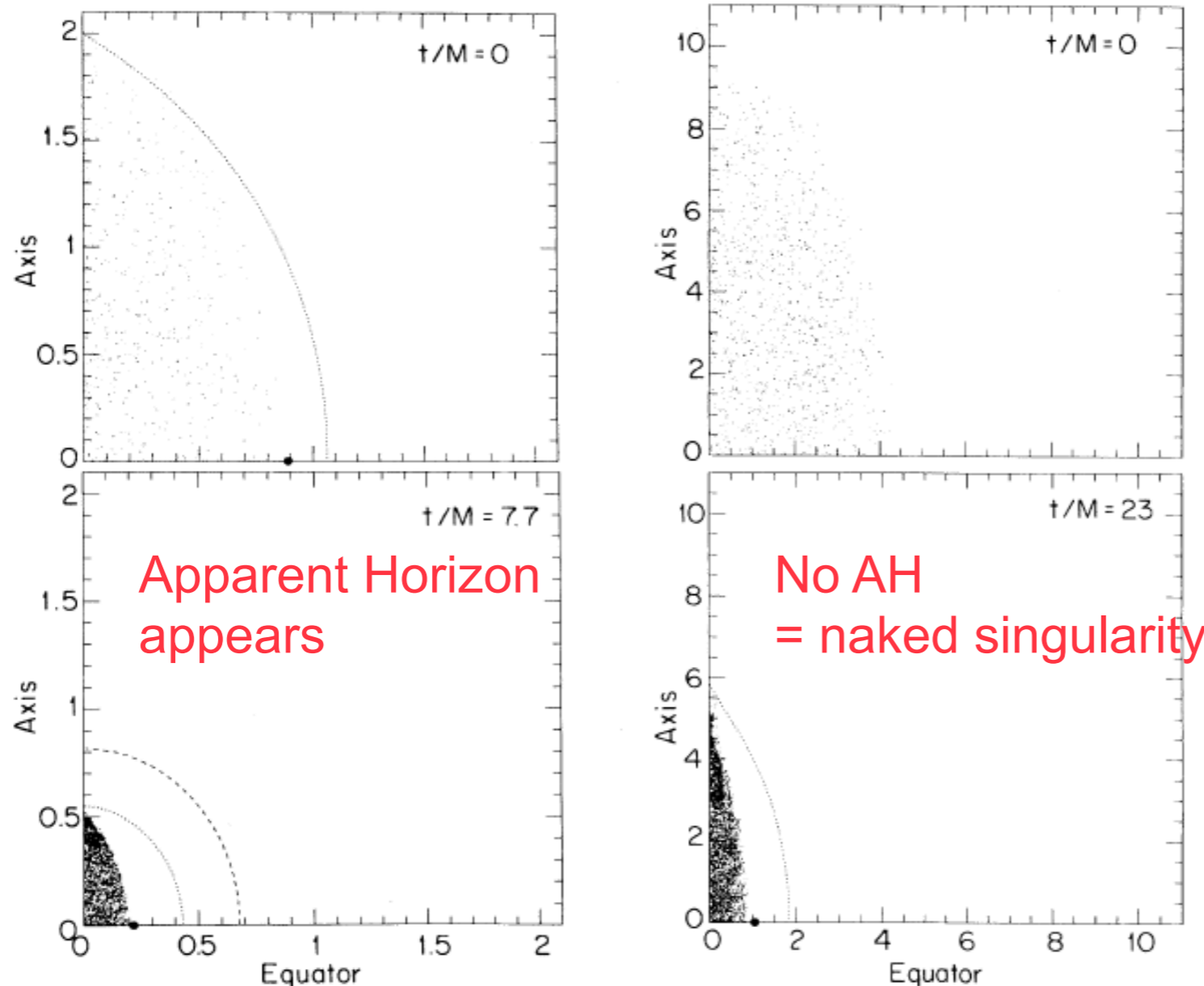


FIG. 1. Snapshots of the particle positions at initial and late times for prolate collapse. The positions (in units of M) are projected onto a meridional plane. Initially the semimajor axis of the spheroid is $2M$ and the eccentricity is 0.9. The collapse proceeds nonhomologously and terminates with 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 $c_{\text{pole}}^{\text{AH}}/4\pi M=1.03$ and $c_{\text{eq}}^{\text{AH}}/4\pi M=0.91$. 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 $c_{\text{eq}}^{\text{min}}/4\pi M=0.59$ and $c_{\text{pole}}^{\text{min}}/4\pi M=0.99$. The formation of a black hole is thus consistent with the hoop conjecture.

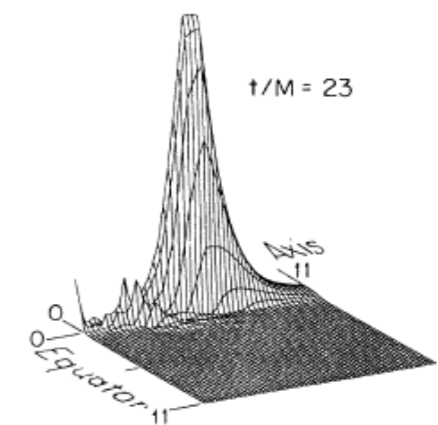


FIG. 4. Profile of I in a meridional plane for the collapse shown in Fig. 2. For the case of 32 angular zones shown here, the peak value of I is $24/M^4$ and occurs on the axis just outside the matter.

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

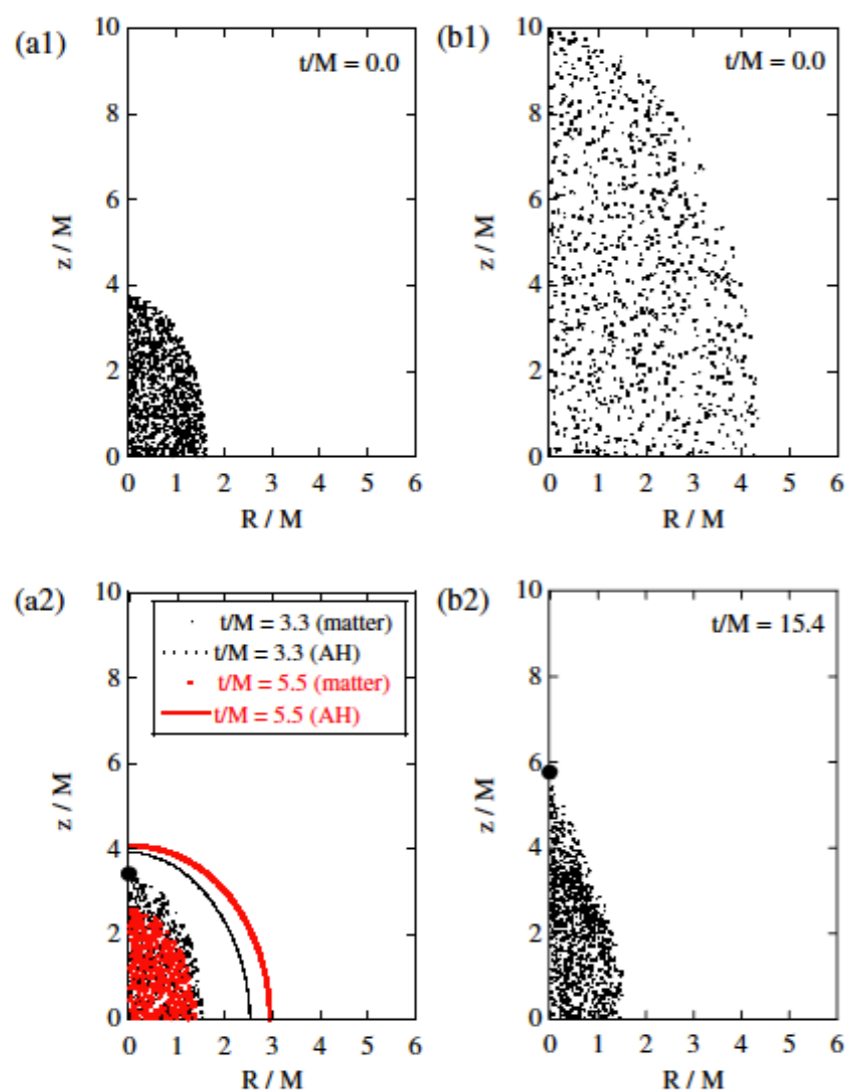


FIG. 2 (color online). Snapshots of 5D axisymmetric evolution with the initial matter distribution of $b/M = 4$ [(a1) and (a2); model 5DS β in Table I] and 10 [(b1) and (b2); model 5DS δ]. We see the apparent horizon (AH) is formed at the coordinate time $t/M = 3.3$ for the former model and the area 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.

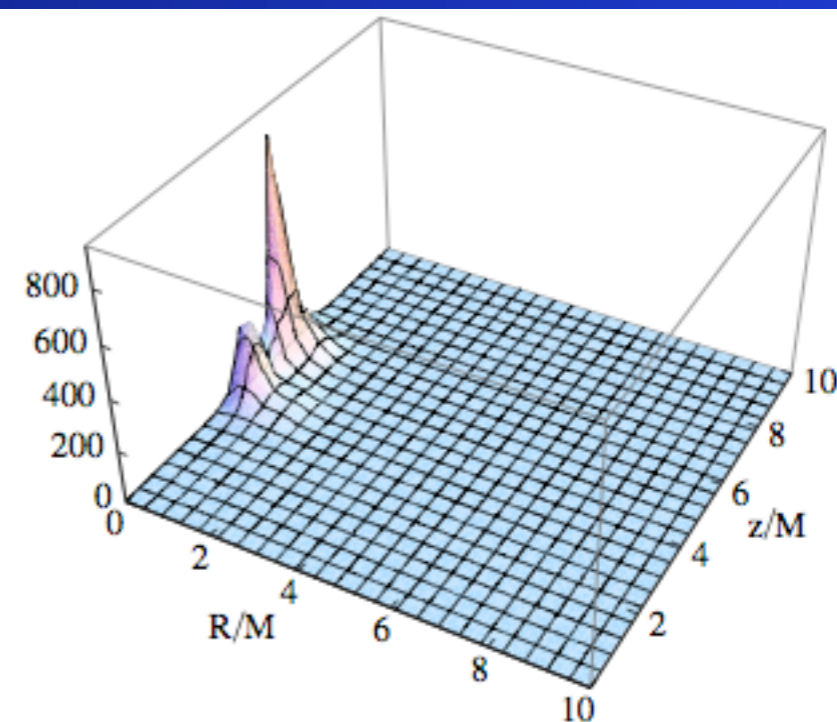


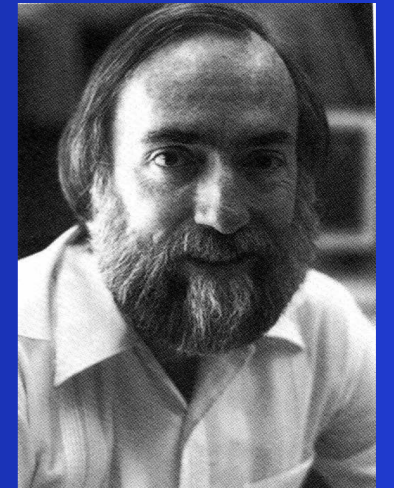
FIG. 3 (color online). Kretschmann invariant I for model 5DS δ at $t/M = 15.4$. The maximum is $O(1000)$, and its location is on z -axis, just outside of the matter.

ホーキングとソーンの賭け 2



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

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

ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. ブラックホールはどうできた？
星の進化シナリオ
4. **未解決問題**
 - A. 銀河中心ブラックホールの形成
 - B. 時空特異点の問題
 - C. **重力波観測で見つかった正体不明天体**
 - D. 相対性理論はどこまで正しい理論か

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

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

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

JORGE CHAM © 2016

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

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

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

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

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

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

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

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

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

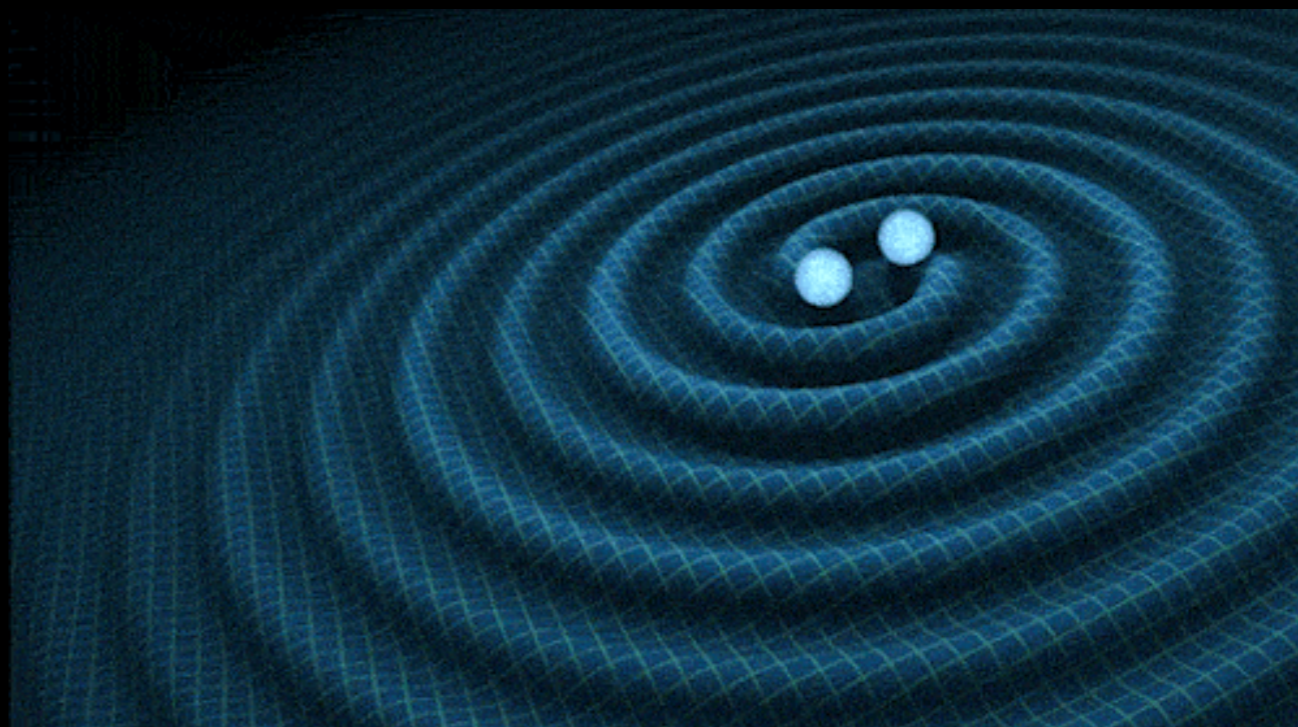
...EXAMINING THE EXTREME EDGES OF OUR KNOWLEDGE OF PHYSICS...

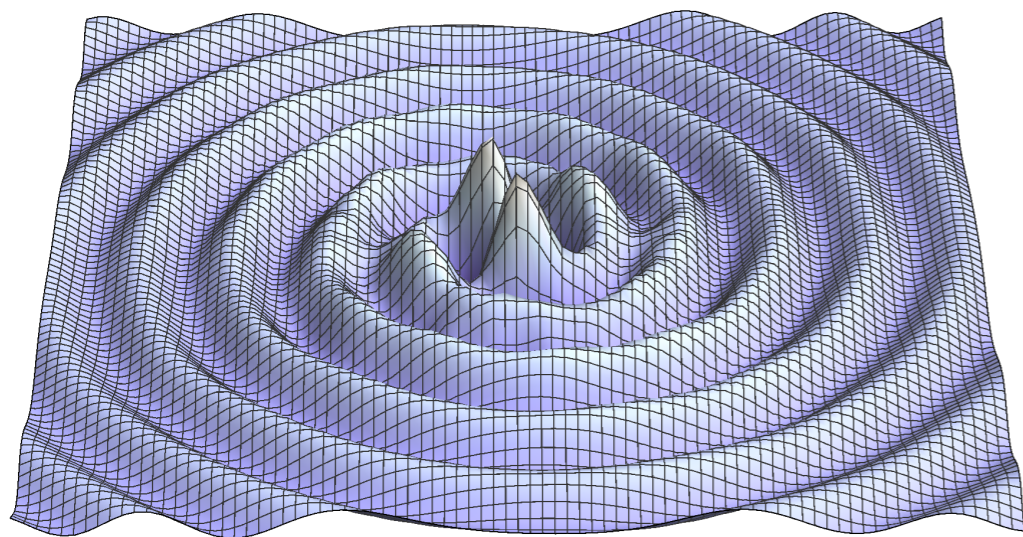
...AND TESTING OUR THEORIES ABOUT HOW THE UNIVERSE WORKS.

JORGE CHAM © 2016

WWW.PHDCOMICS.COM

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





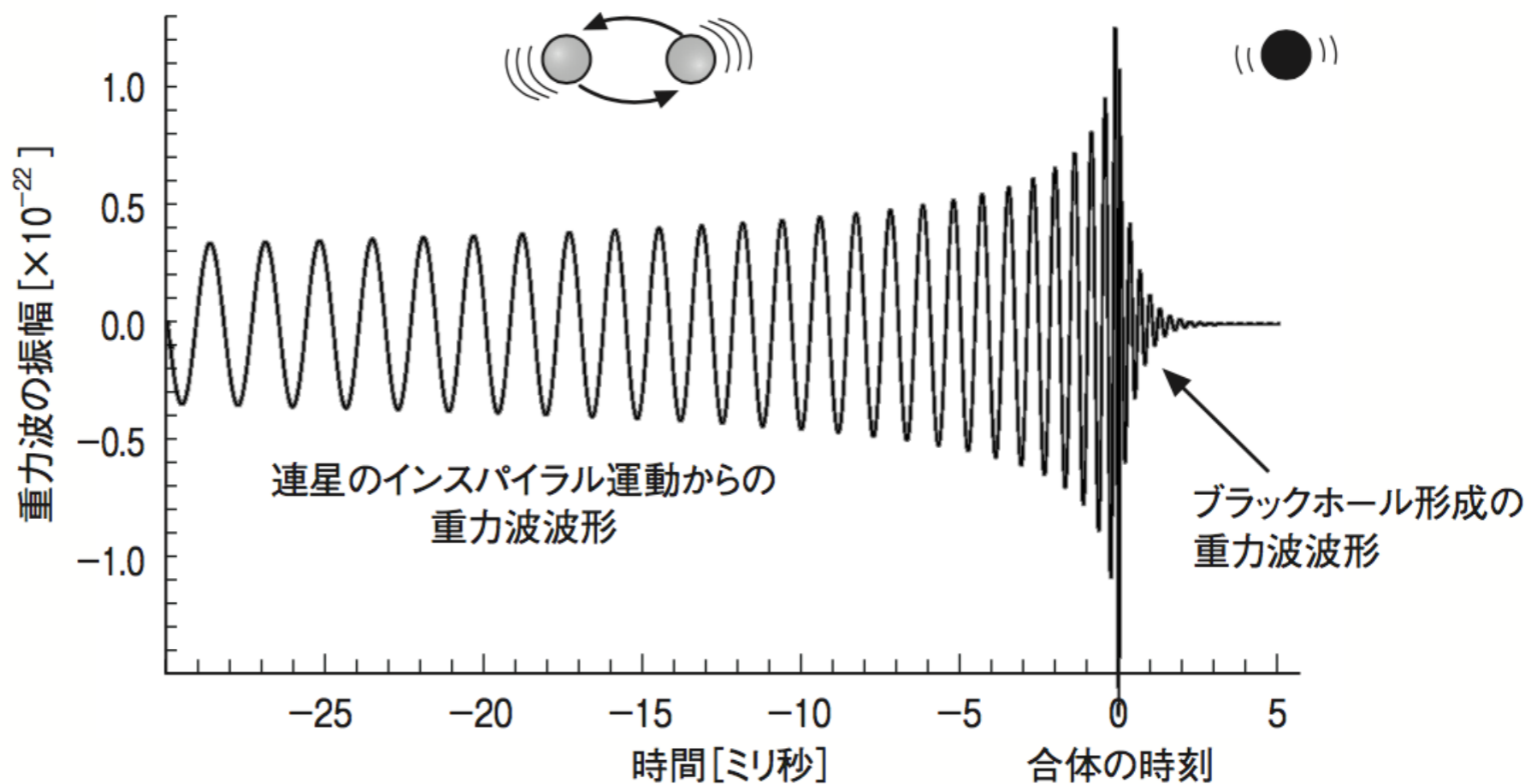
重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星
連星ブラックホール

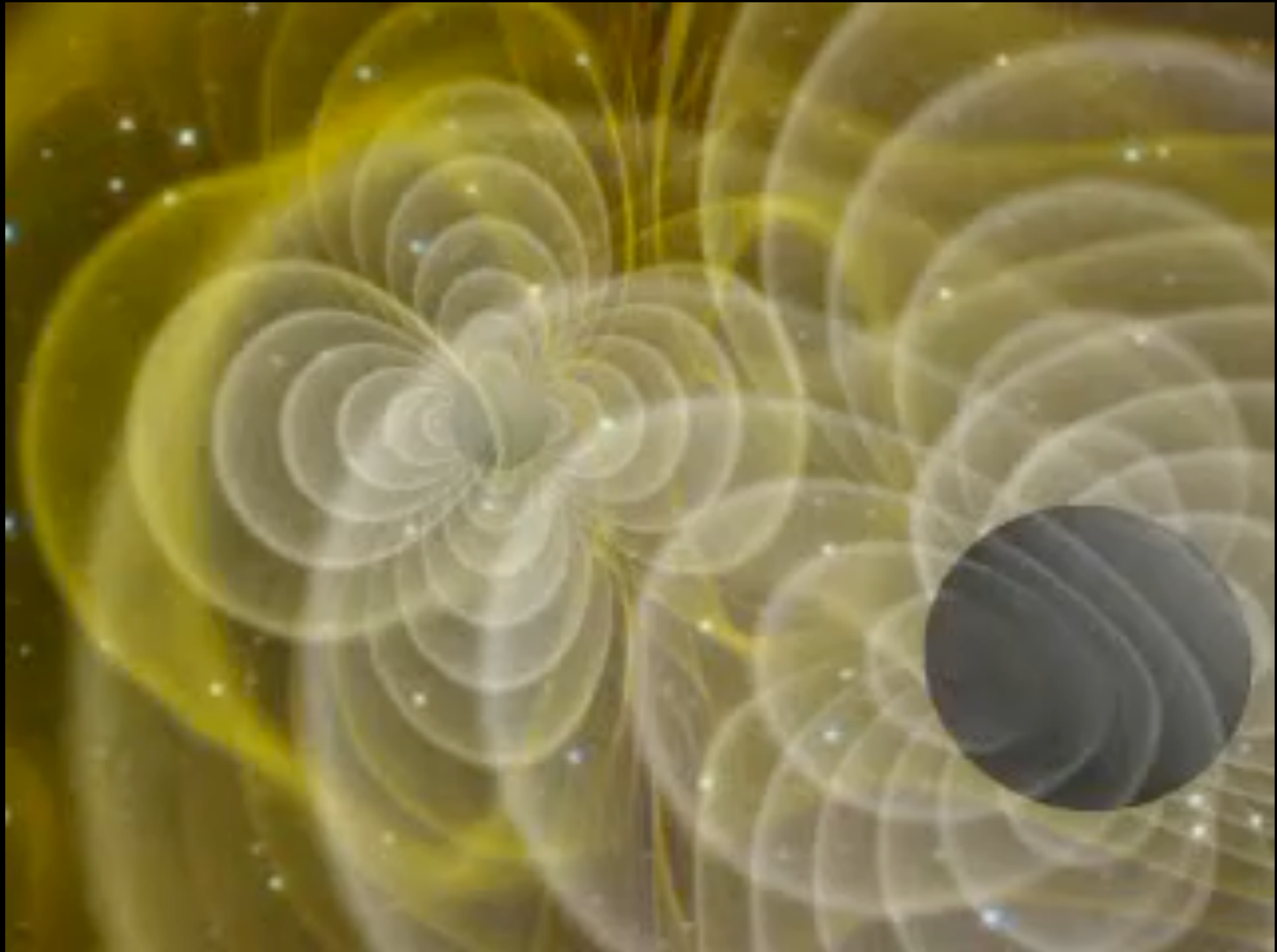
インスパイラル

合体

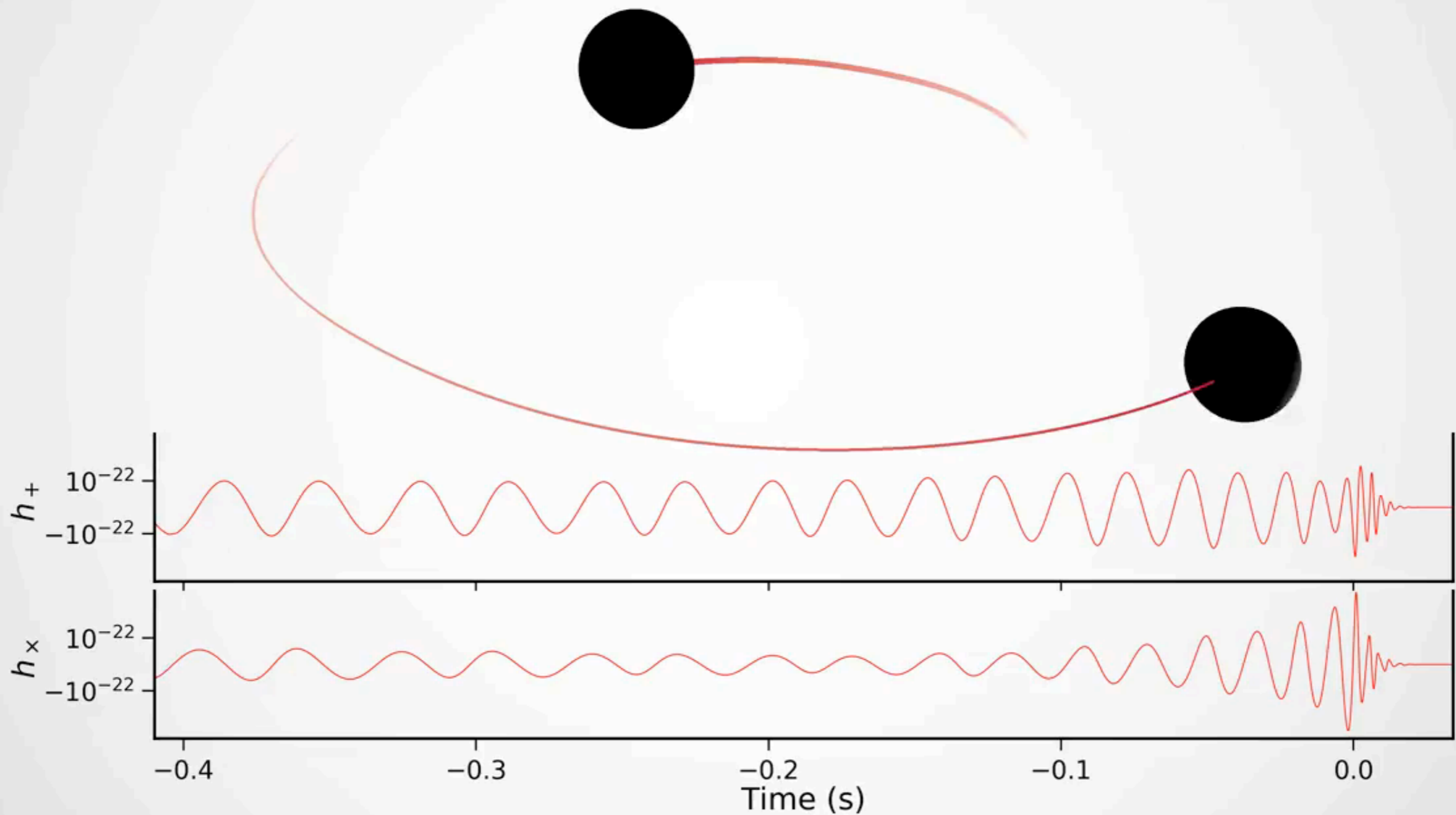
リングダウン



ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)



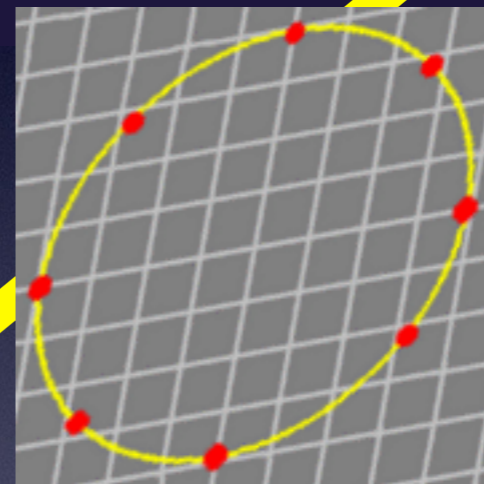
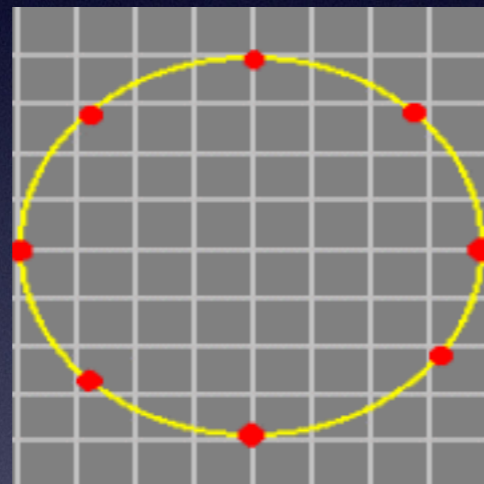
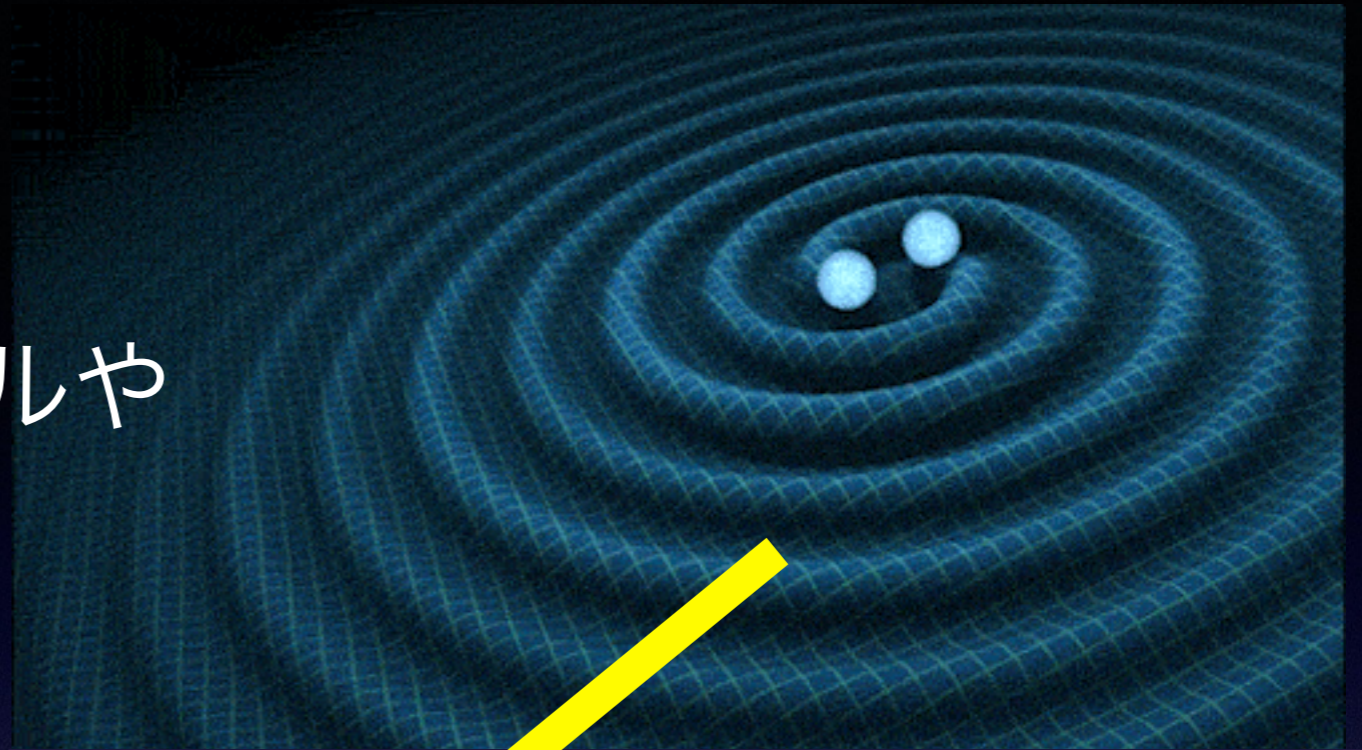
Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown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

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



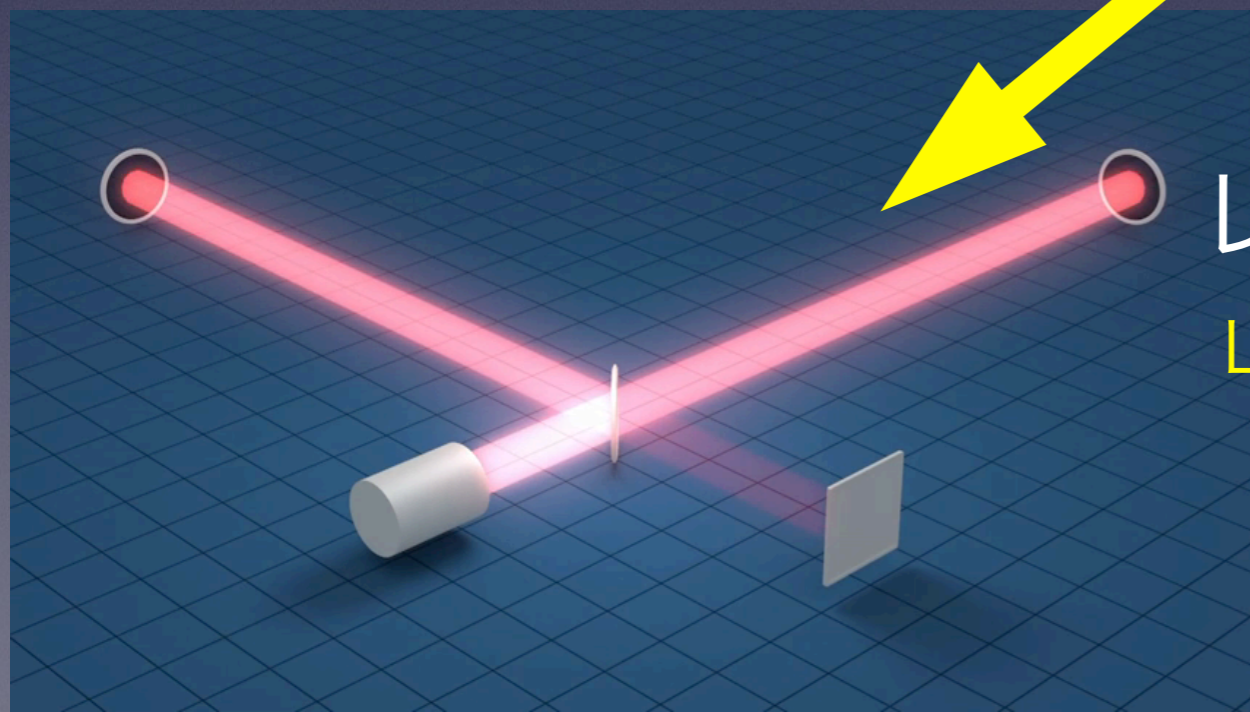
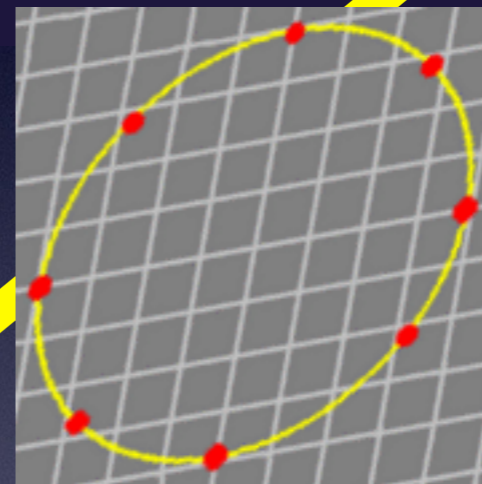
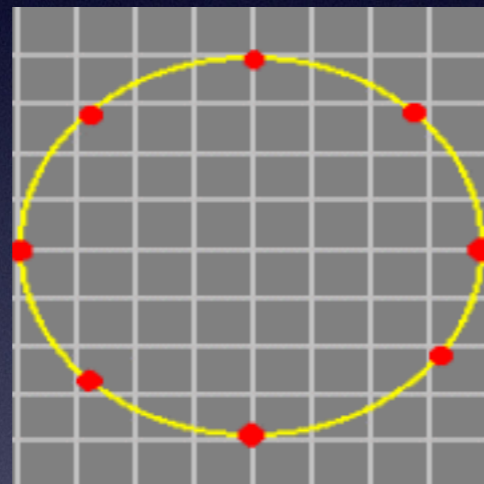
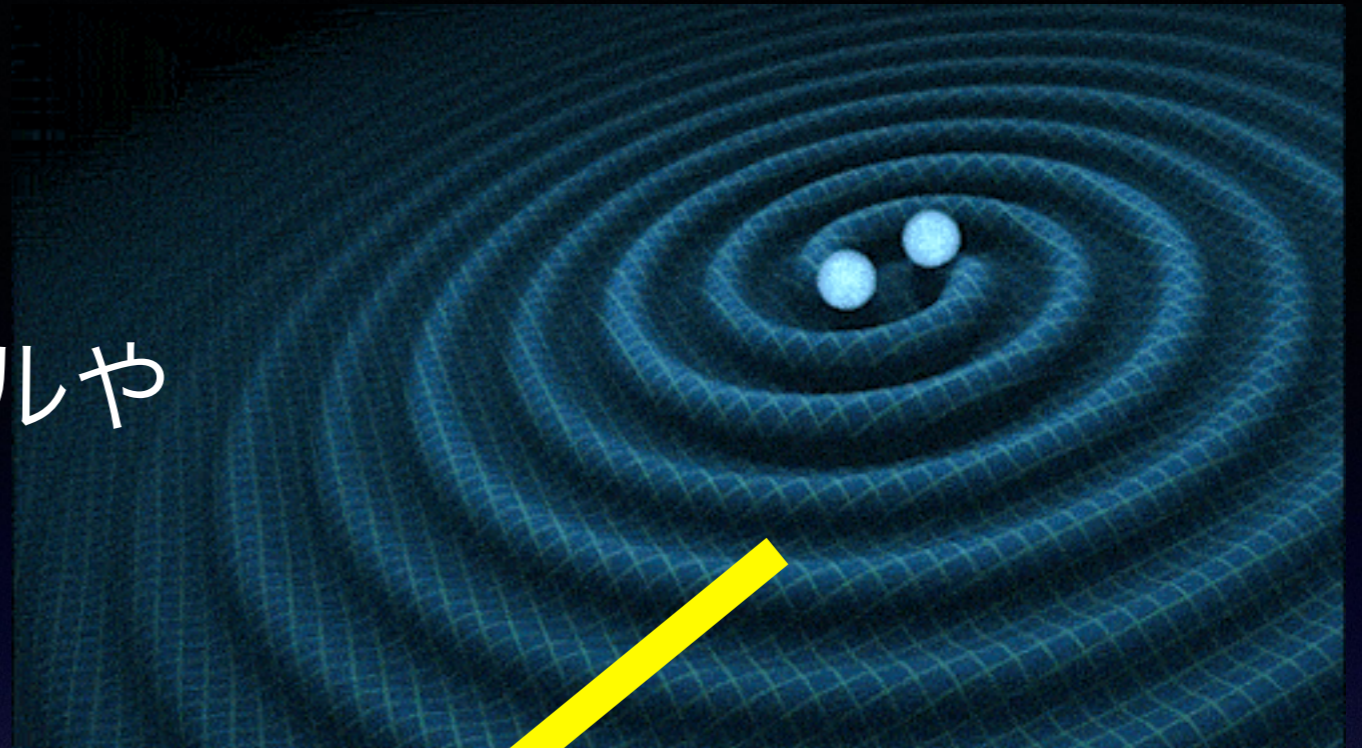
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

世界の重力波観測ネットワーク

4 km



4 km

600 m



3 km



KAGRA Hida
Japan

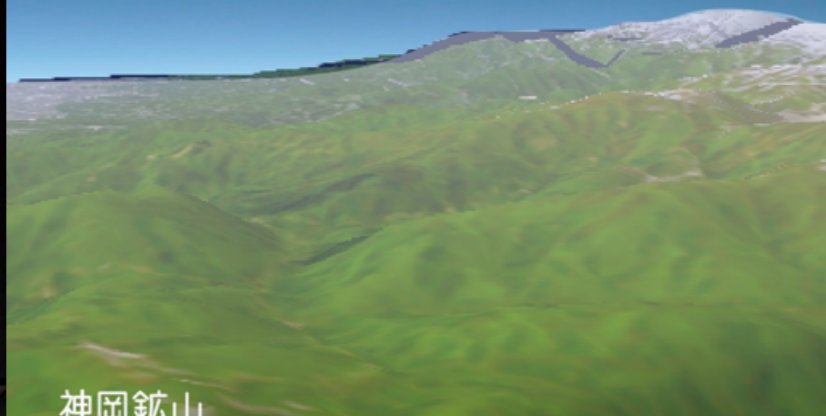


3 km

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector

大型低温重力波望遠鏡



神岡鉱山
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

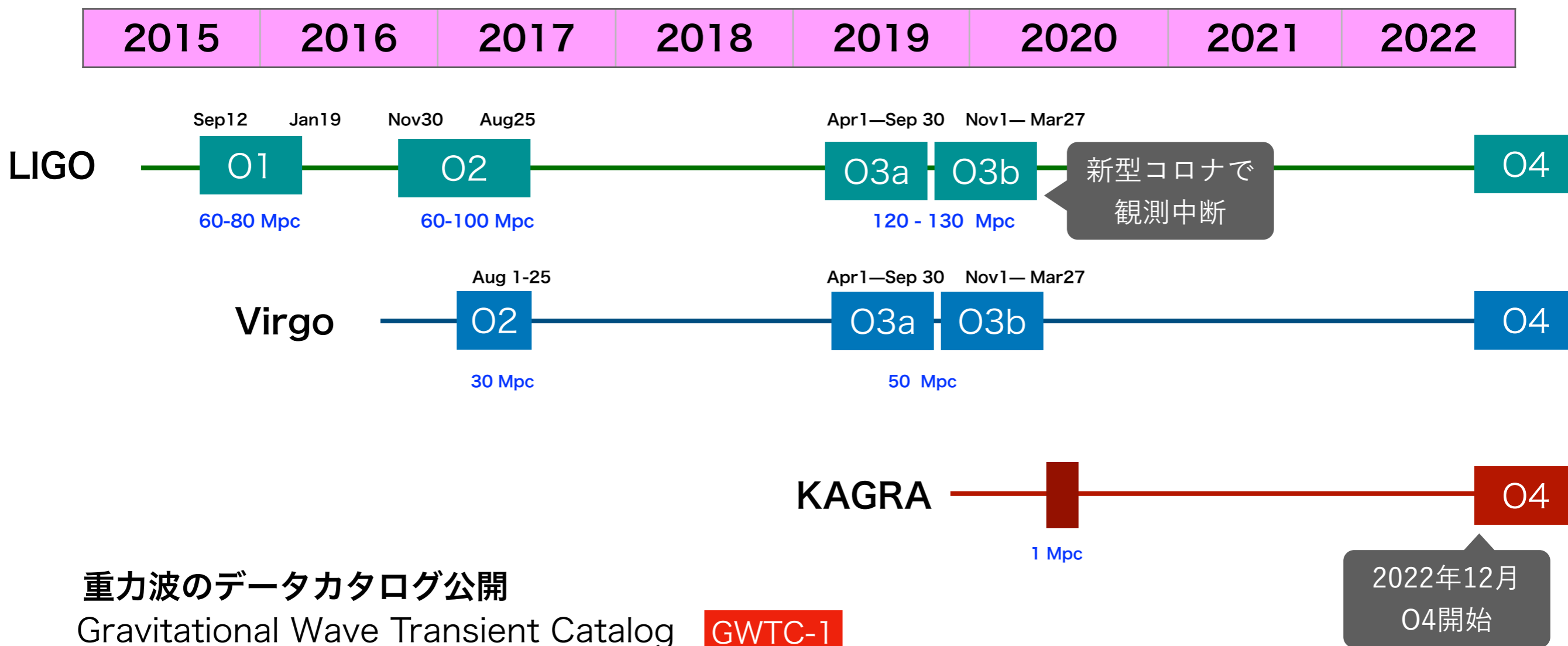
鏡をマイナス250度 (20K) まで
冷却

熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア

光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b)



重力波のデータカタログ公開

Gravitational Wave Transient Catalog

GWTC-1

2018/12/3

GWTC-2

2020/10/28

GWTC-2.1

2021/8/2

GWTC-3

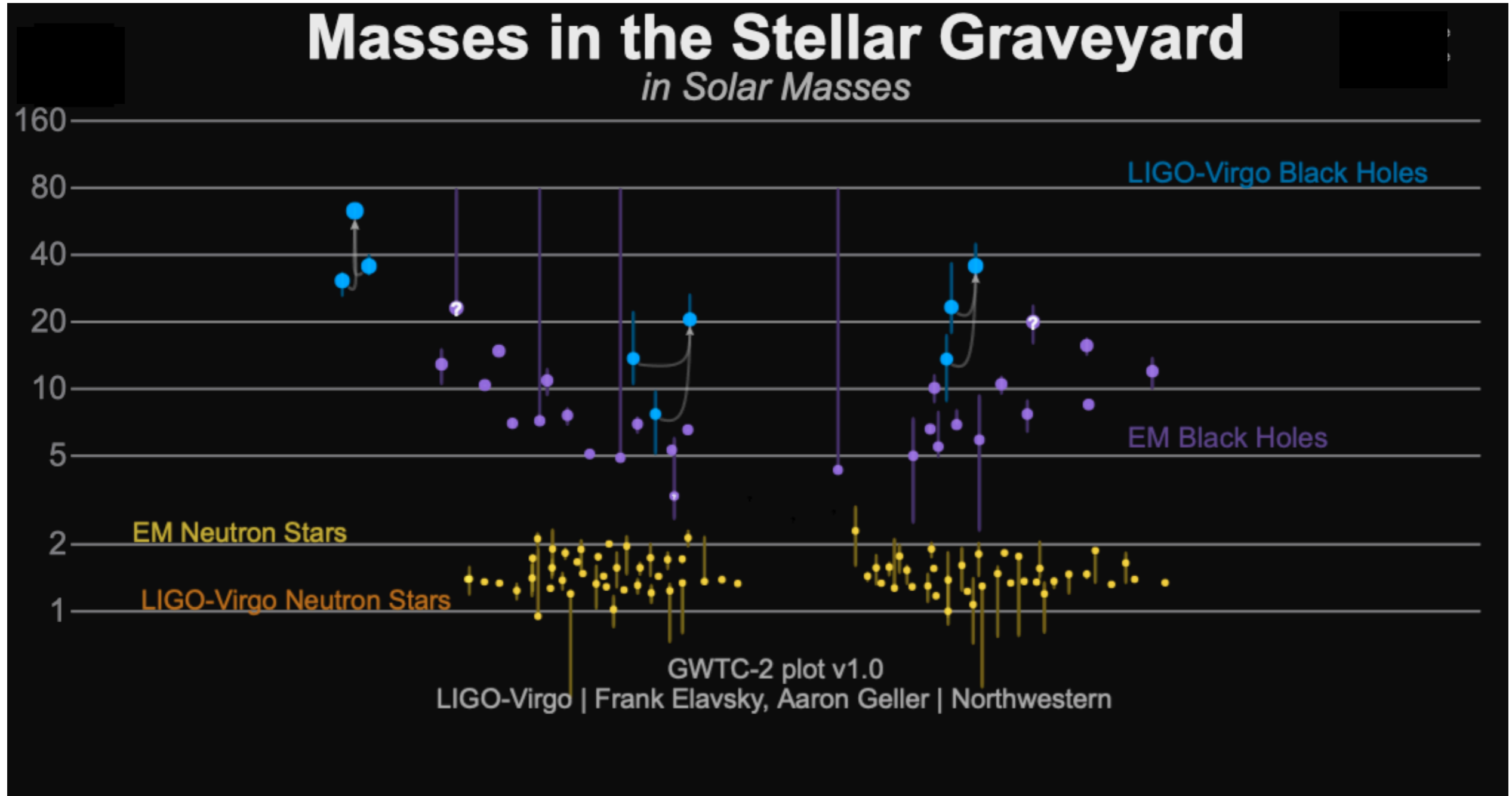
2021/11/5

2022年12月
O4開始



<https://www.gw-openscience.org>

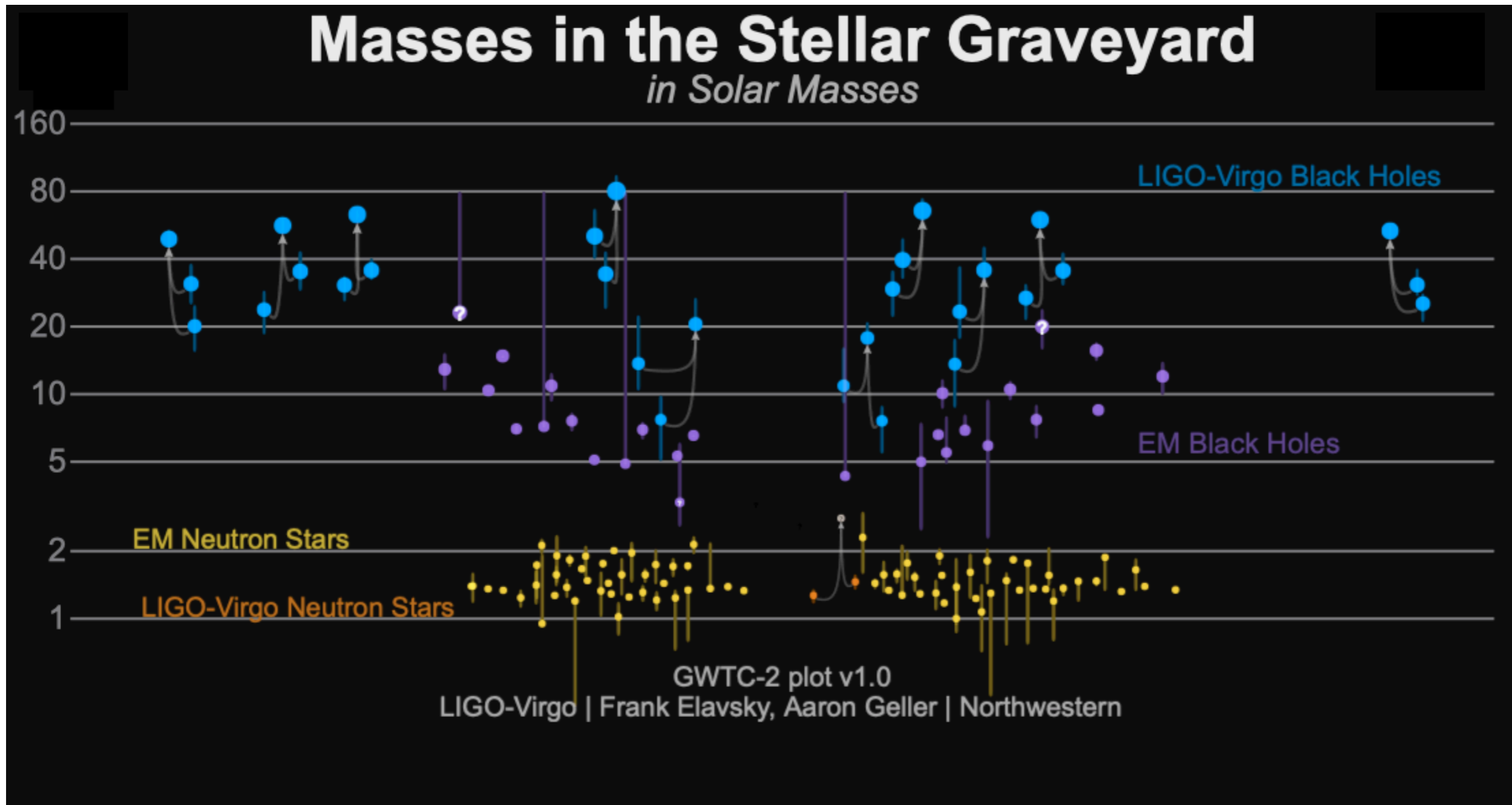
O1 (2015/9/12 - 2016/1/19)



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>



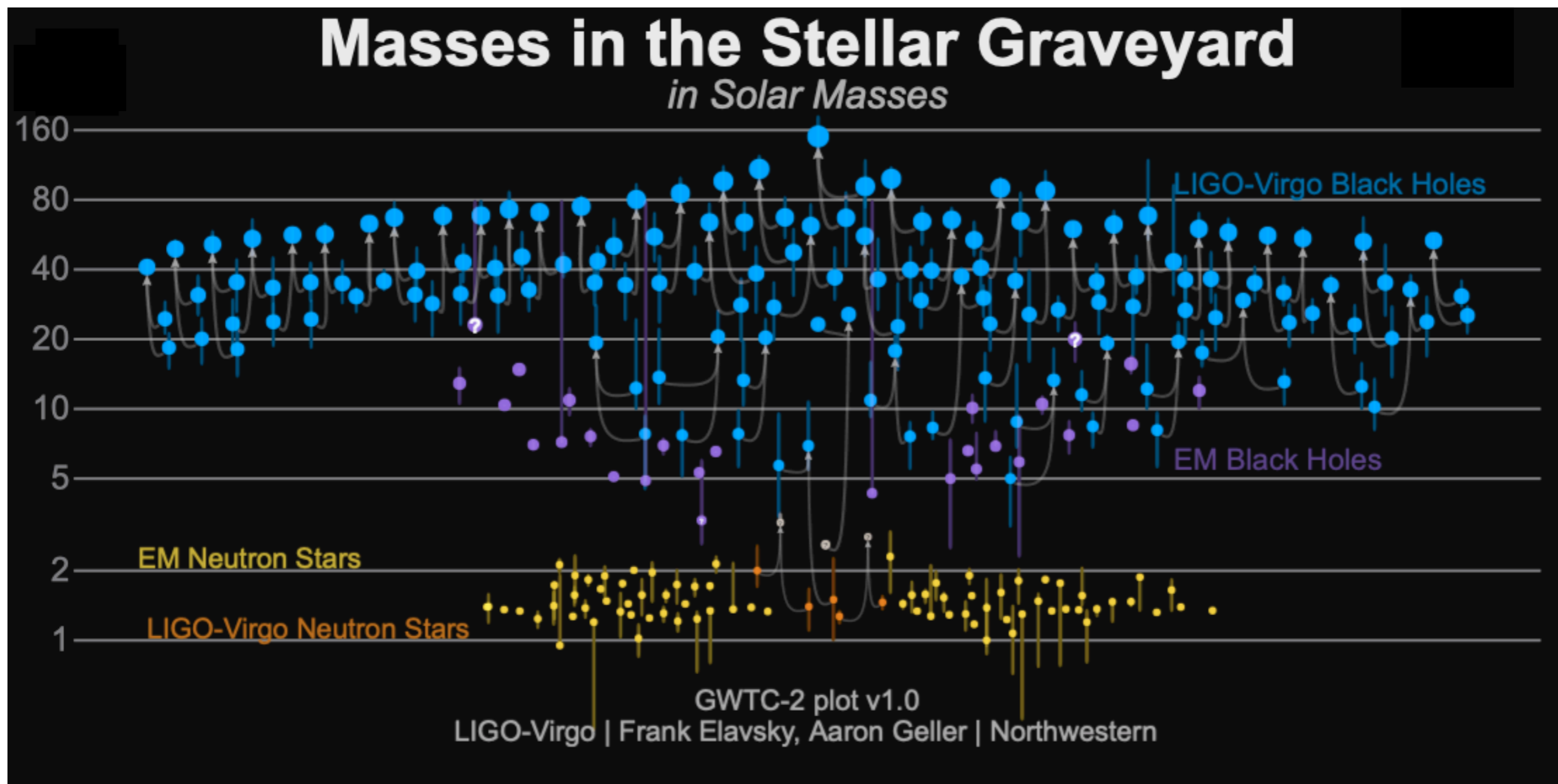
- GW170814: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- GW170817: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic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

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

10 BHBH
1 NSNS

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

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



- [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+?

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年以來可能になった。

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、O3a と呼ばれる観測期間終了までに、BBH による重力波が 46 例、BNS による重力波が 2 例報告されている。日本の KAGRA（かぐら）も O3b 観測期間の最後に共同観測に入った。O3b 期の重力波イベントは 2021 年 7 月時点で未発表である。現在、各干渉計は次の観測期間 O4（2022 年夏から 1 年間の予定）に向けて観測感度を上げるため、干渉計の改良中である。

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。

表 1: 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	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	N 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

表 2: 過去の観測期間

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

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 2(GWTC2) として 2020 年 10 月に発表されたものが 2021 年 7 月時点で最新である。

GW150914 最初に報告された直接重力波観測イベント。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。報告された BBH のイベントの中でも最もシグナル・ノイズ比 (SNR) が高い。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。ガンマ線と重力波の到着時刻の差 1.7 秒から得られた重力は伝播速度の光速からのず

れの割合に対する制限は 1×10^{-15} 以下である。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 $150M_{\odot}$ を超えるものと考えられる。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 星形成のシナリオでは不可能とされる $2\text{--}5M_{\odot}$ 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。GW200105, GW200115: はじめて確実なものと報告された NS-BH 連星系合体。

表 3: 報告された主な重力波 (2021 年 7 月現在)。連星の質量を M_1, M_2 としたときの、チャープ質量 $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$ 、質量比 (中央値の比) M_2/M_1 、有効スピン χ_{eff} 、最終的に形成された BH の質量 M_{final} (NS を含む場合は全質量 $M_{\text{全}} = M_1 + M_2$)、距離、波源特定精度 (平方度) $(\Delta\theta)^2$ 、シグナル・ノイズ比を示す。幅のある量は 90% の信頼区間。(種類ごとに日付順。BBH については、SNR が 13.1 より大きいもののみ。)

イベント (BBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{final}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	440^{+150}_{-170}	179	24.4
GW170608	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	0.69	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.4}_{-0.7}$	320^{+120}_{-110}	392	14.9
GW170814	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	$53.2^{+3.2}_{-2.4}$	600^{+150}_{-220}	87	15.9
GW190408_181802	$18.3^{+1.9}_{-1.2}$	0.75	$0.03^{+0.14}_{-0.19}$	$41.1^{+2.8}_{-2.8}$	1550^{+400}_{-600}	–	14.67
GW190412	$13.3^{+0.4}_{-0.3}$	0.28	$0.25^{+0.08}_{-0.11}$	$37.3^{+3.9}_{-3.8}$	740^{+140}_{-170}	21	18.86
GW190521	$69.2^{+17.0}_{-10.6}$	0.72	$0.03^{+0.32}_{-0.39}$	$156.3^{+21.9}_{-22.4}$	3920^{+1950}_{-1950}	940	14.38
GW190521_074359	$32.1^{+3.2}_{-2.5}$	0.78	$0.09^{+0.1}_{-0.13}$	$71.0^{+6.5}_{-4.4}$	1240^{+400}_{-570}	500	24.38
GW190630_185205	$24.9^{+2.1}_{-2.1}$	0.68	$0.1^{+0.12}_{-0.13}$	$56.4^{+4.4}_{-4.6}$	890^{+560}_{-370}	–	15.64
GW190728_064510	$8.6^{+0.5}_{-0.3}$	0.66	$0.12^{+0.07}_{-0.07}$	$19.6^{+4.7}_{-1.3}$	870^{+260}_{-370}	–	13.64
GW190814	$6.09^{+0.06}_{-0.06}$	0.11	$0^{+0.06}_{-0.06}$	$25.6^{+1.1}_{-0.9}$	240^{+40}_{-50}	19	22.18
GW190828_063405	$25.0^{+3.4}_{-2.1}$	0.82	$0.19^{+0.15}_{-0.16}$	$54.9^{+7.2}_{-4.3}$	2130^{+660}_{-930}	520	16.04
GW190910_112807	$34.3^{+4.1}_{-4.1}$	0.81	$0.02^{+0.18}_{-0.18}$	$75.8^{+8.5}_{-8.6}$	1460^{+1030}_{-580}	–	13.42
GW190924_021846	$5.8^{+0.2}_{-0.2}$	0.56	$0.03^{+0.3}_{-0.09}$	$13.3^{+5.2}_{-1.0}$	570^{+220}_{-220}	380	13.16
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	$0^{+0.02}_{-0.01}$	–	$40^{+7.0}_{-15.0}$	39	33
GW190425	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	0.70	$0.06^{+0.11}_{-0.05}$	$3.4^{+0.3}_{-0.1}$	160^{+70}_{-70}	9900	13.03
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
GW200105_162426	$3.41^{+0.08}_{-0.07}$	0.21	$-0.01^{+0.11}_{-0.15}$	$10.9^{+1.1}_{-1.2}$	280^{+110}_{-110}	7700	13.9
GW200115_042309	$2.42^{+0.05}_{-0.07}$	0.26	$-0.19^{+0.23}_{-0.35}$	$7.1^{+1.5}_{-1.4}$	300^{+150}_{-100}	900	11.6

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、 $23.8^{+14.0}_{-8.7} / \text{Gpc}^3 / \text{yr}$ 、BNS は、 $561^{+834}_{-413} / \text{Gpc}^3 / \text{yr}$ 、NSBH は、 $45^{+73}_{-33} / \text{Gpc}^3 / \text{yr}$ 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) $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ 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。



➡ 50 events in total

GWTC-2

2020/10/28

➡ 55 total

GWTC-2.1

2021/8/2

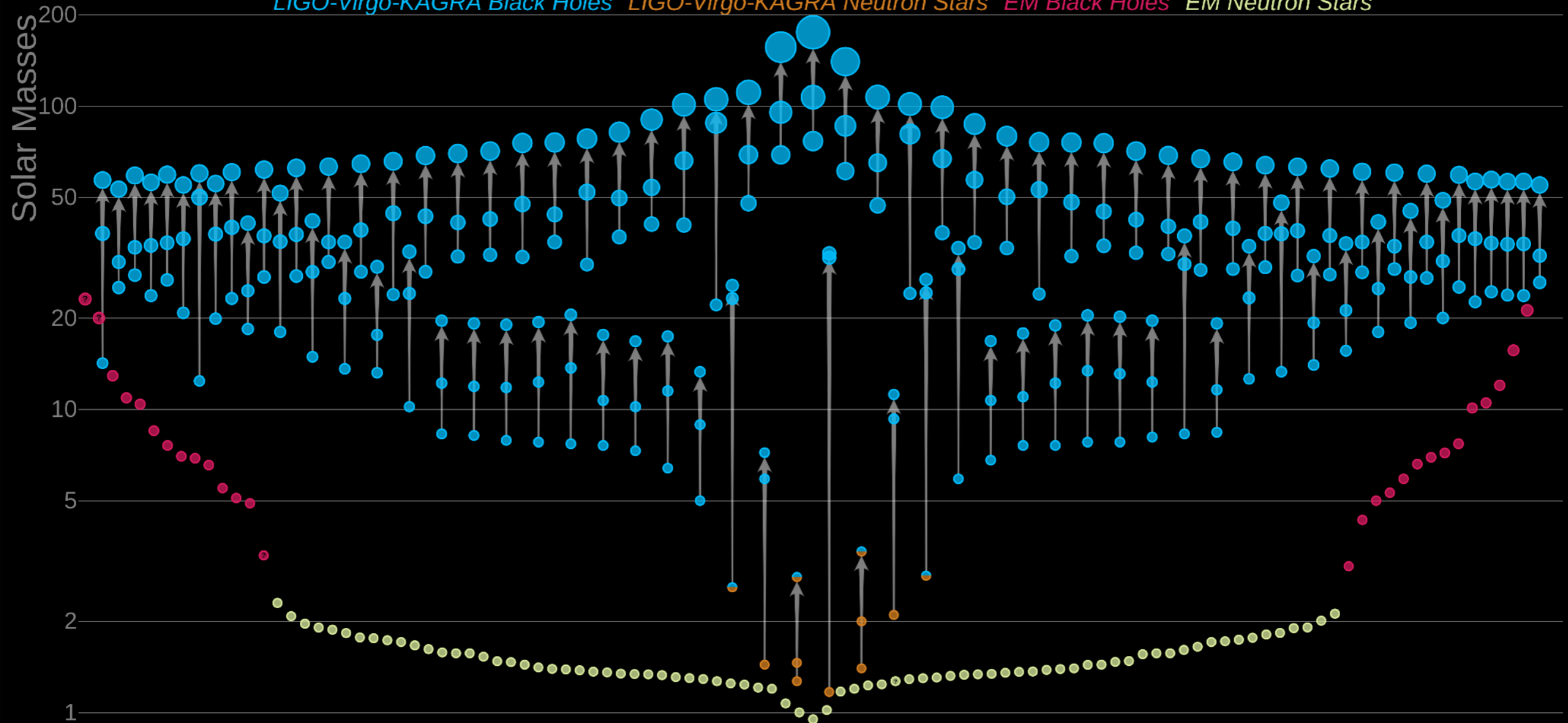
➡ 90 total

GWTC-3

2021/11/5

Masses in the Stellar Graveyard

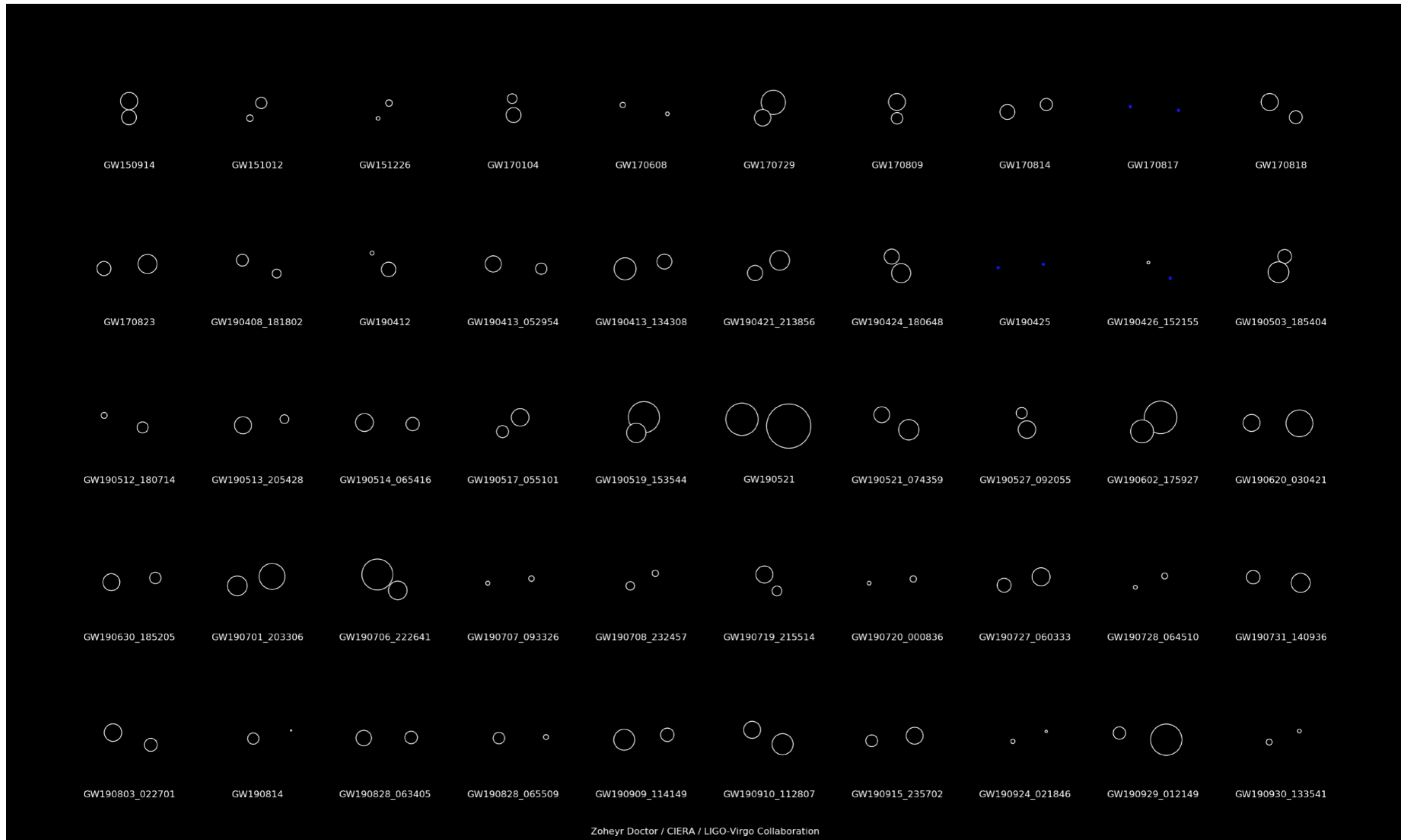
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

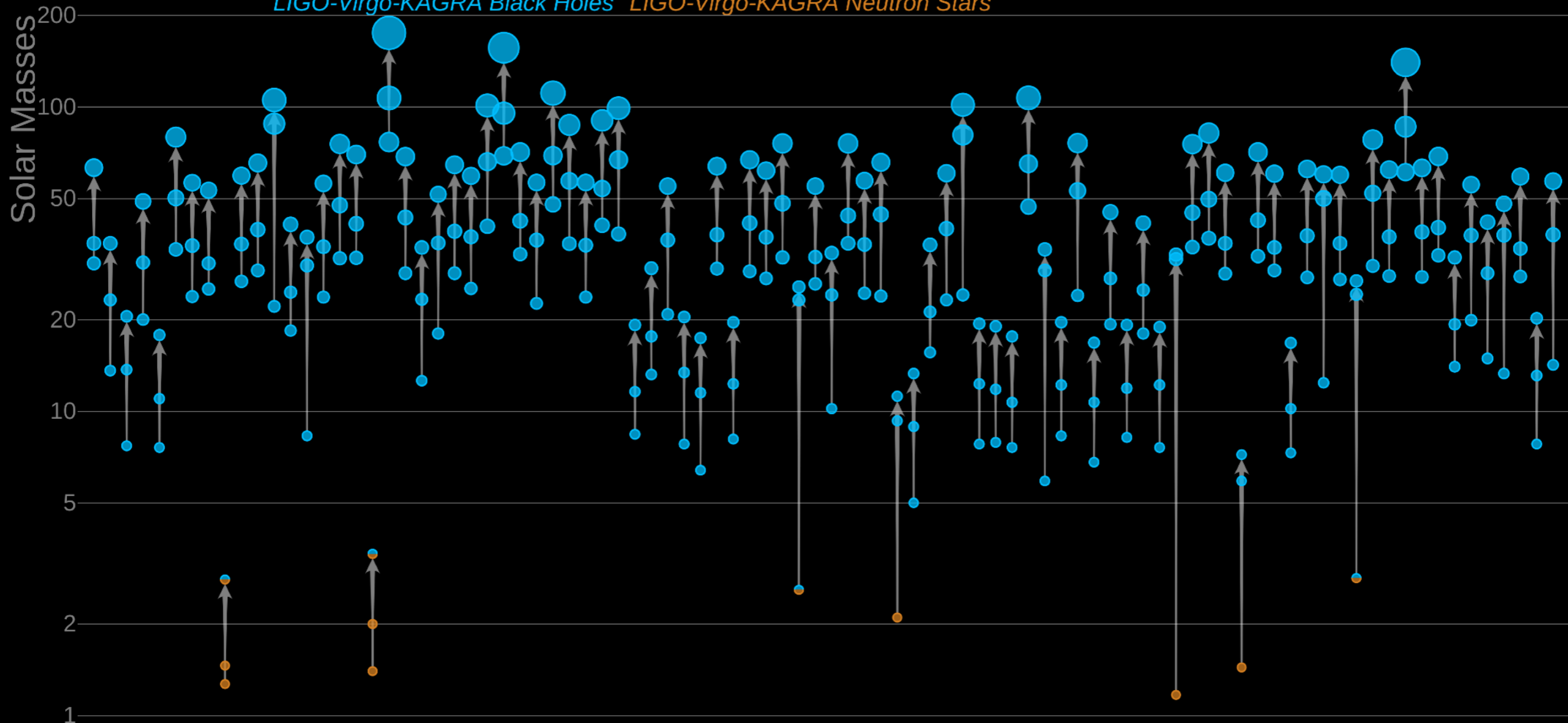
O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

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



Masses in the Stellar Graveyard

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



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

O1

O2

O3a

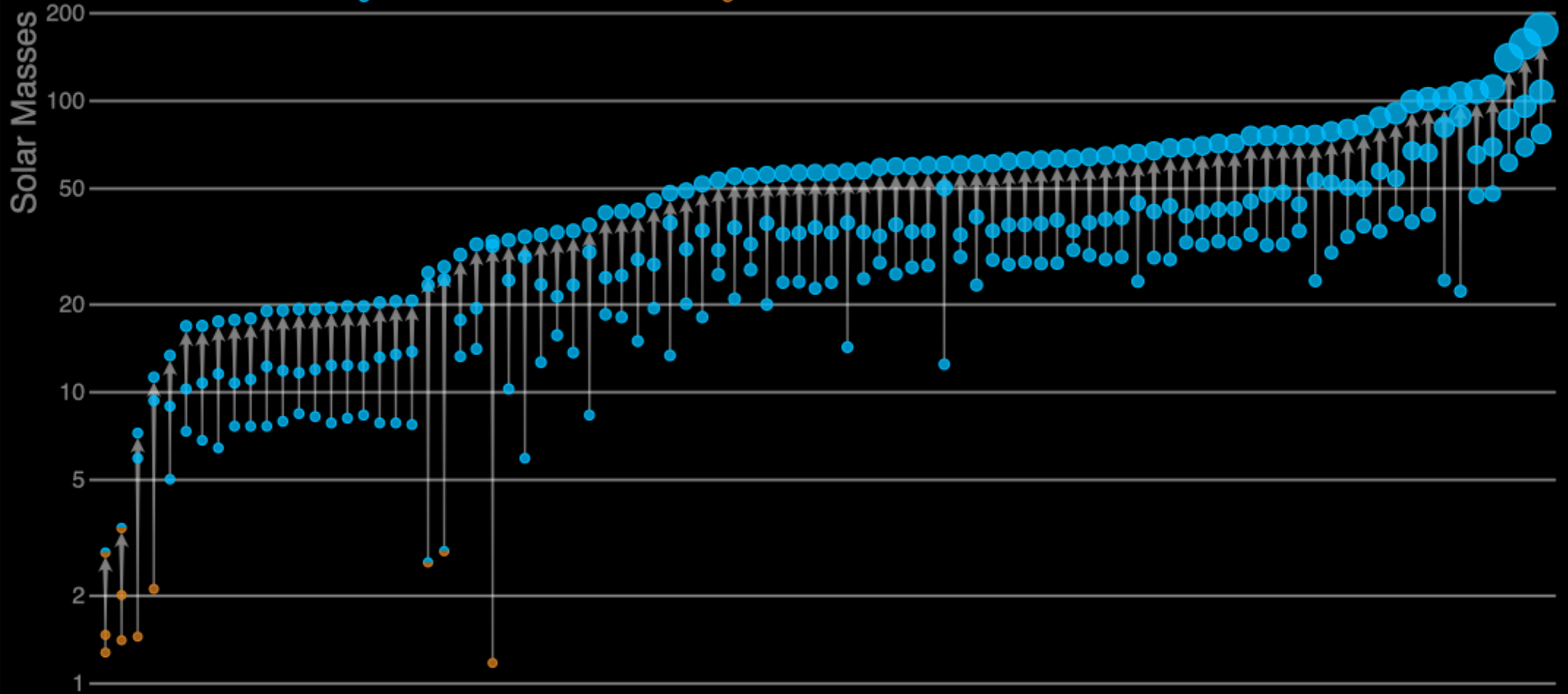
O3b

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

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

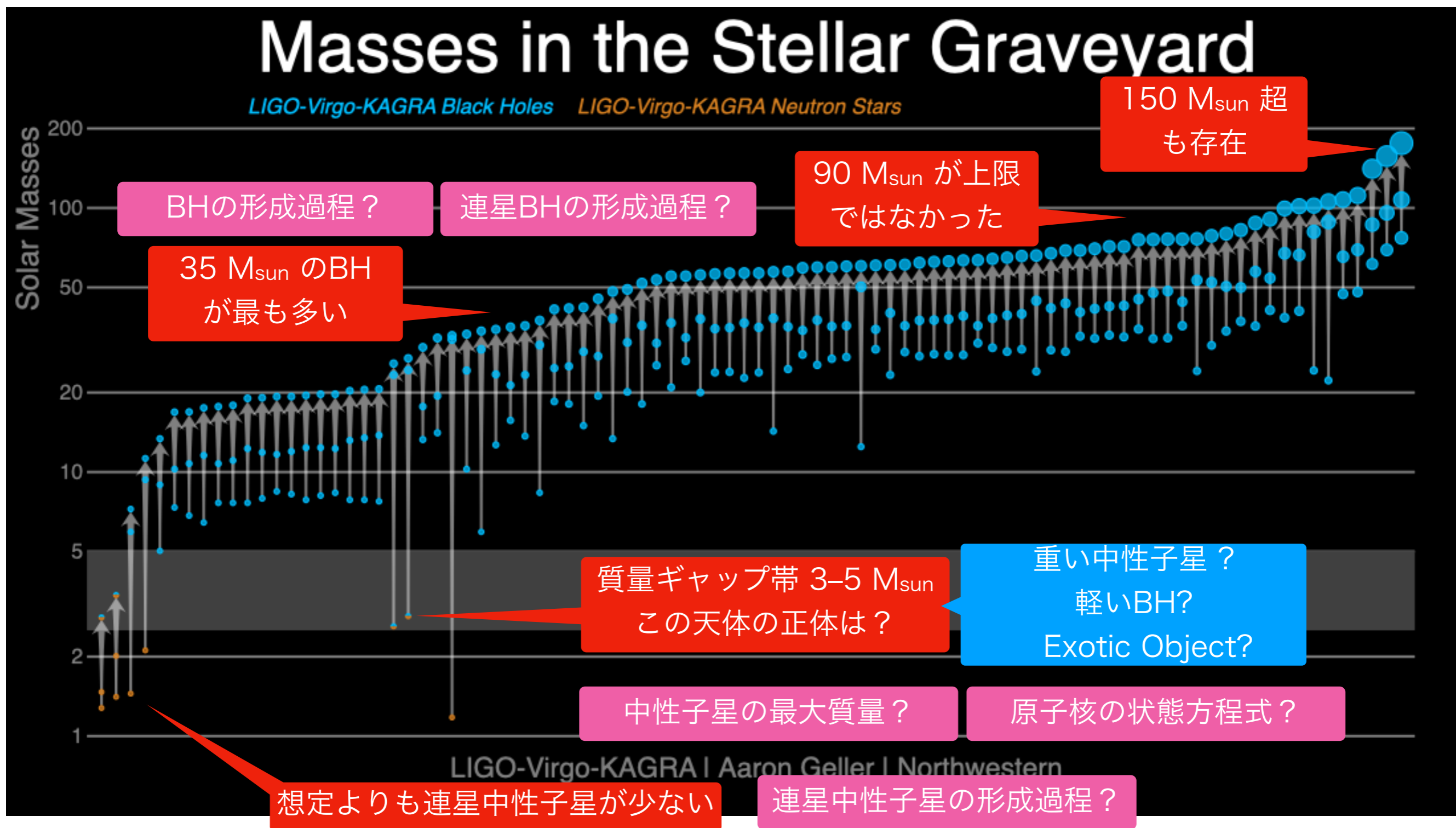
Masses in the Stellar Graveyard

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



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

この現状をどう説明する？



マルチ・メッセンジャー天文学の誕生



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

ガンマ線

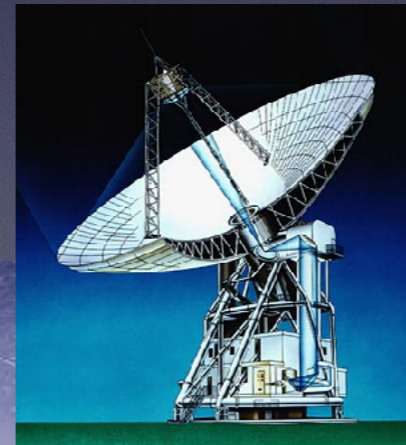
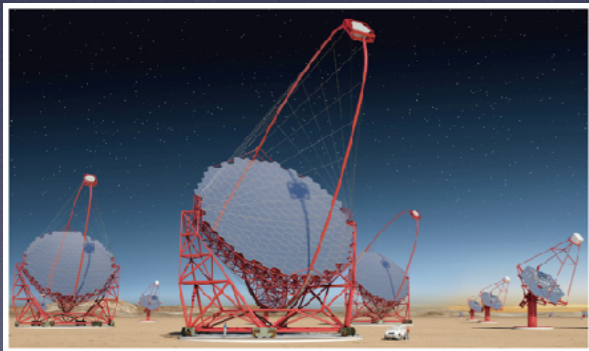
X線

可視光

赤外

電波

重力波



重力波天文学
はじめました。



Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

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



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

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

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

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

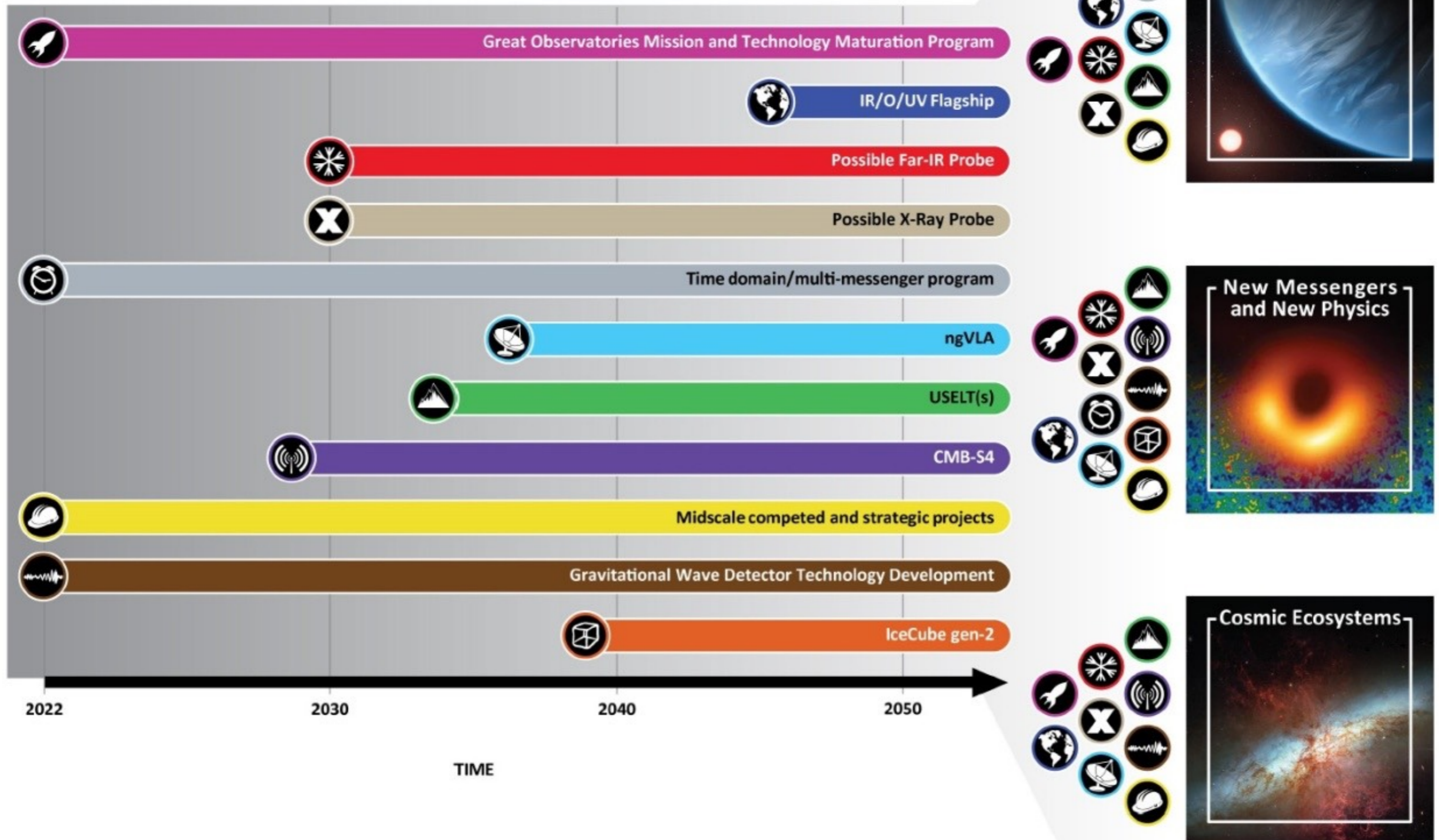
(iii) Drivers of Galaxy Growth 銀河進化を生態系として理解する

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

Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

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

Astro2020の将来計画予定年表



ブラックホールって何？

物理学者の考えるブラックホールと、天文学者の扱うブラックホール

1. アインシュタインの相対性理論
特殊相対性理論, 一般相対性理論
2. ブラックホールが見つかるまで
解の発見から天体現象の発見まで, 銀河中心ブラックホールの発見
3. ブラックホールはどうできた？
星の進化シナリオ
4. **未解決問題**
 - A. 銀河中心ブラックホールの形成
 - B. 時空特異点の問題
 - C. 重力波観測で見つかった正体不明天体
 - D. **相対性理論はどこまで正しい理論か**

一般相対性理論

特殊相対性理論

ニュートン力学

$$F = ma$$

量子力学

量子場の理論

究極の理論

未完成

アインシュタインの理論はどこまで正しいのか？

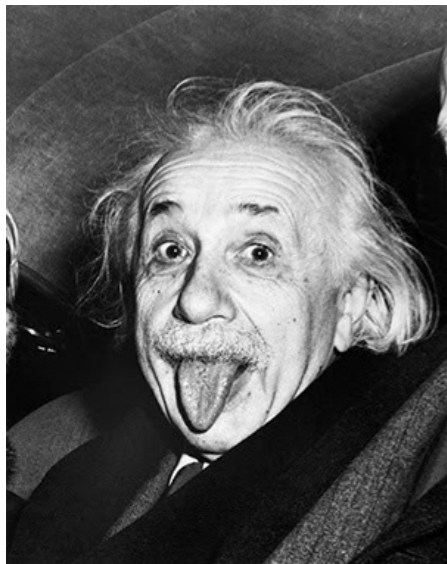
アインシュタインが相対性理論をつくって、100年。
相対性理論は、アインシュタインの想像をも越えた現象を予言してきた

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

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

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

アインシュタインが正しくて、嬉しいような、残念なような...



ほらね！