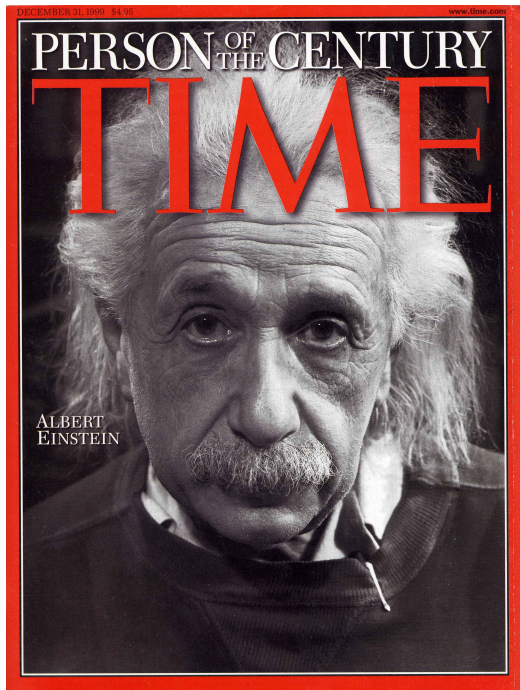


アインシュタインはどこまで正しい？

検証が進む相対性理論



Time
1999/12/31

1. ニュートンの力学（1687年）
2. 2つの相対性理論（1905年, 1915年）
3. ブラックホールの観測
4. 重力波の検出
5. 時計を使った相対性理論の検証

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

重力波干渉計KAGRAプロジェクト科学部門委員長

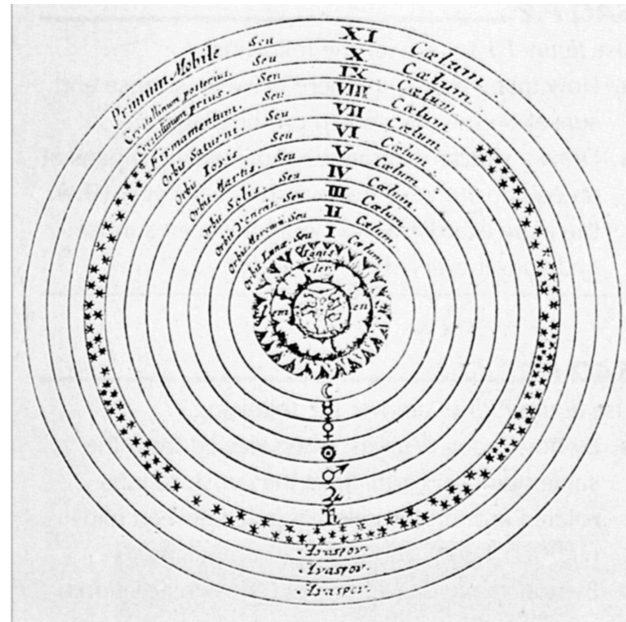


<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

2021/7/18 第11回高校生天文活動発表会

コペルニクス以前の宇宙観

Claudius Ptolemaeus
83年頃 - 168年頃



地球中心説 (天動説)

コペルニクス以降の宇宙観

太陽中心説 (地動説)

ものの見方が180度変わることに

Nicolaus Copernicus
(1473–1543)

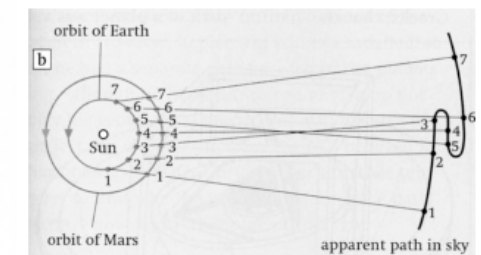
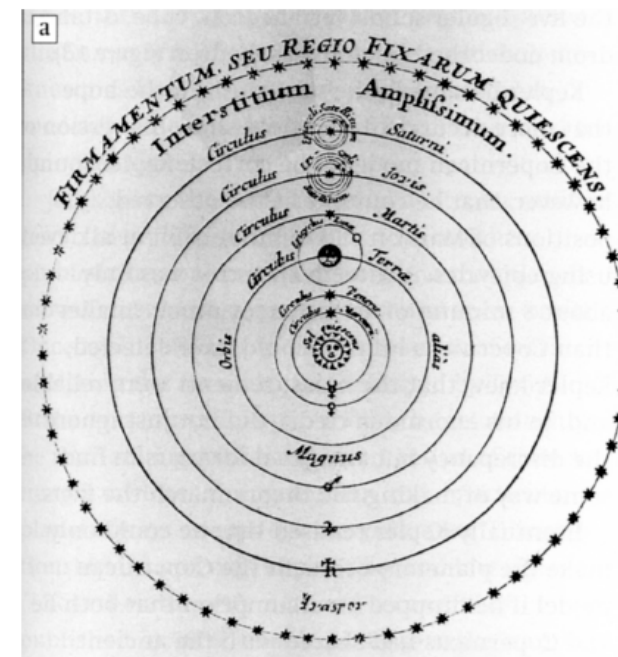
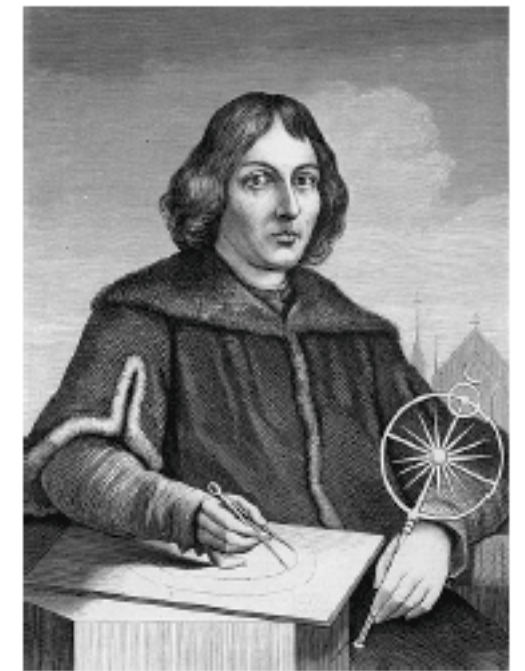
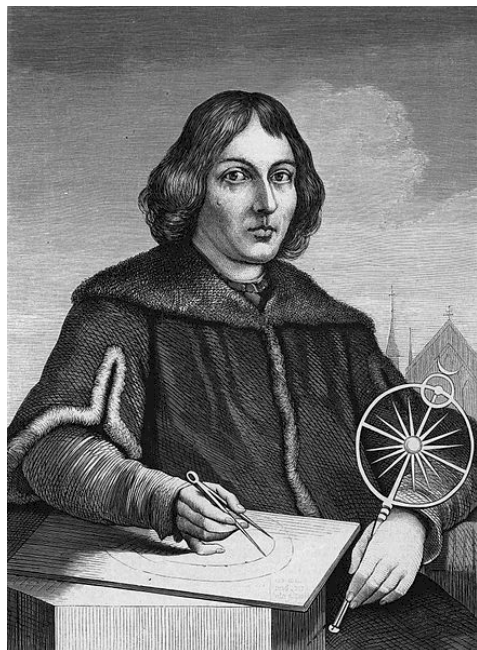


図 13: コペルニクスによる天球図 (地動説). 火星の位置が逆行することが自然に説明できることが述べられている. ([1] より)

近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス

Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



地動説

ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



天体観測

ケプラー

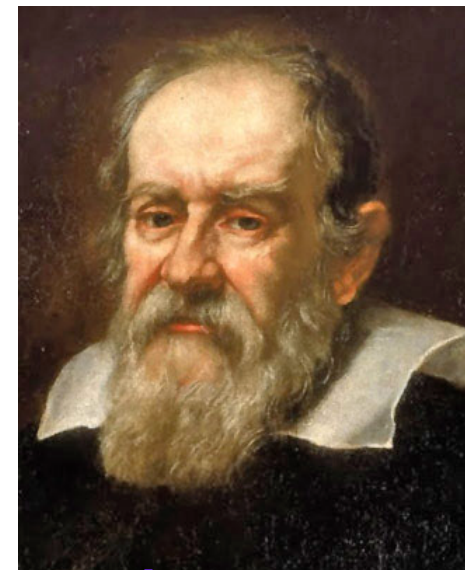
Johannes Kepler
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

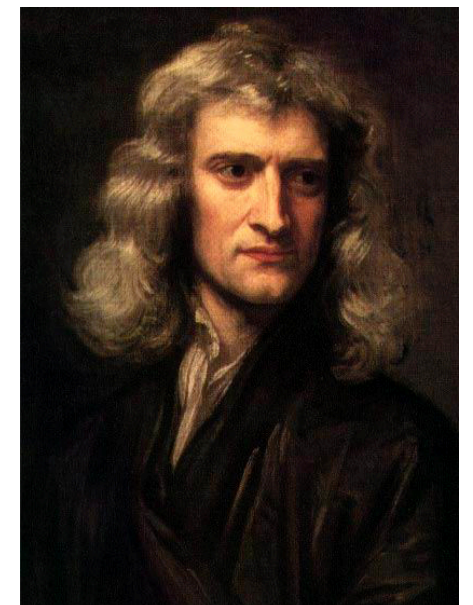
Galileo Galilei
(1564-1642)



慣性・自由落下運動
地動説の物理的根拠

ニュートン

Isaac Newton
(1642-1727)



運動の法則
万有引力

ケプラーによる惑星の運動法則（1609 年, 1619 年）

第 1 法則 楕円軌道の法則

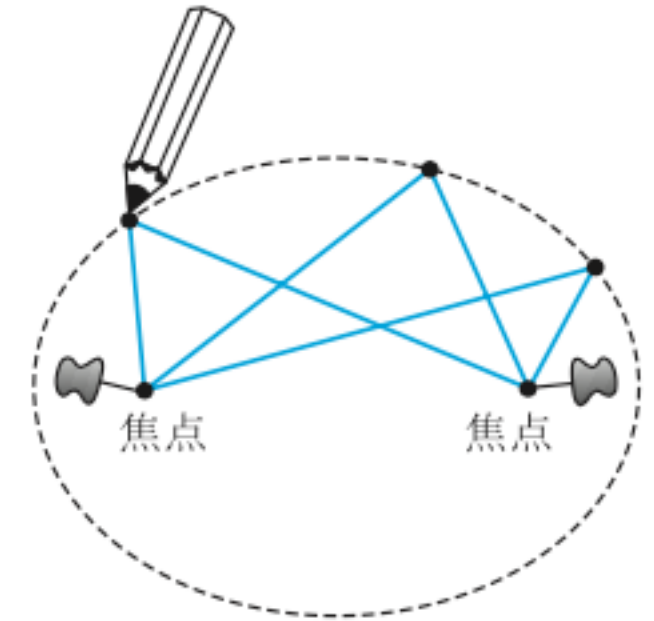
惑星は太陽を 1 つの焦点とする楕円軌道を描く.

第 2 法則 面積速度一定の法則

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積（面積速度）は、惑星それぞれについて一定である.

第 3 法則 調和の法則

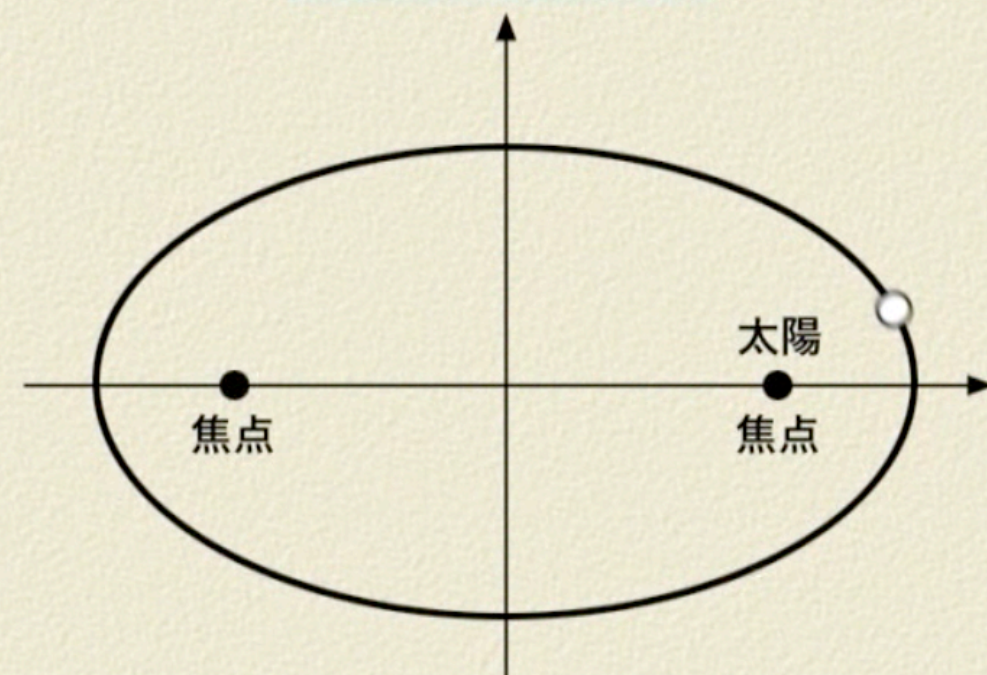
惑星の公転周期 T の 2 乗と、惑星の描く楕円の長軸半径（長軸の長さの半分） R の 3 乗の比 T^2/R^3 は、惑星によらず一定である.



Johannes Kepler
(1571-1630)

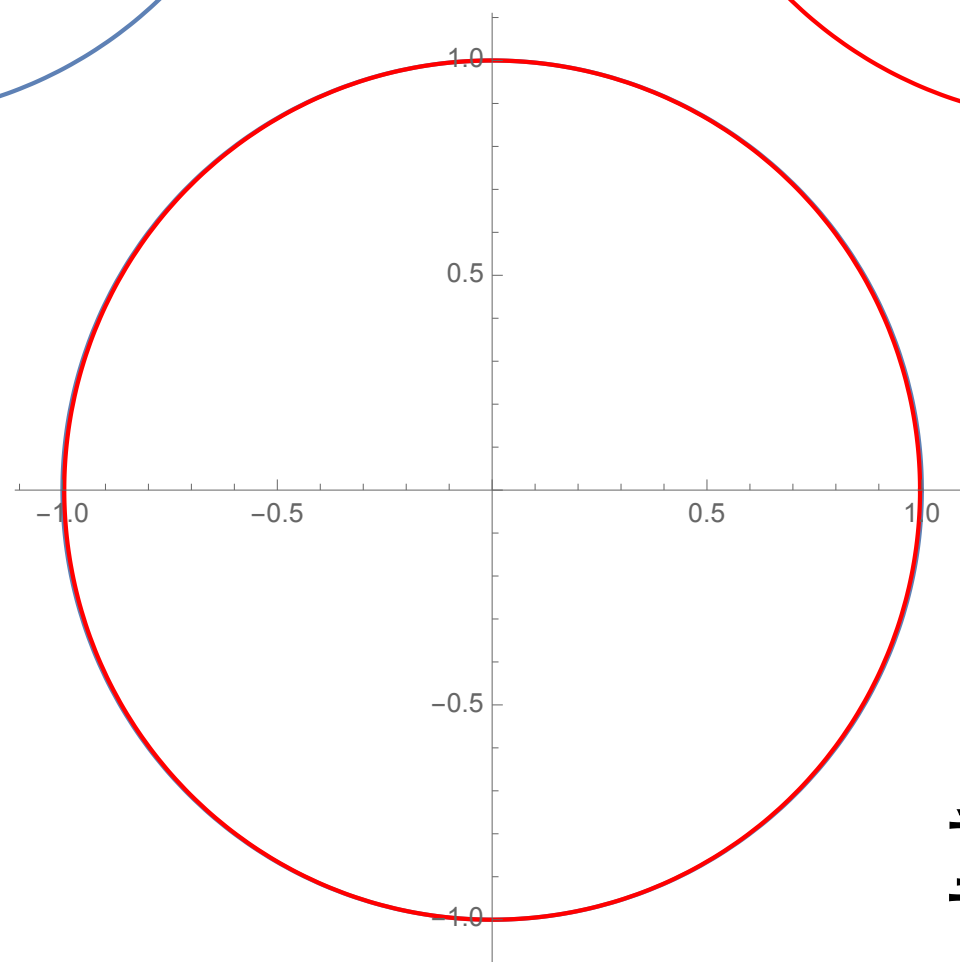
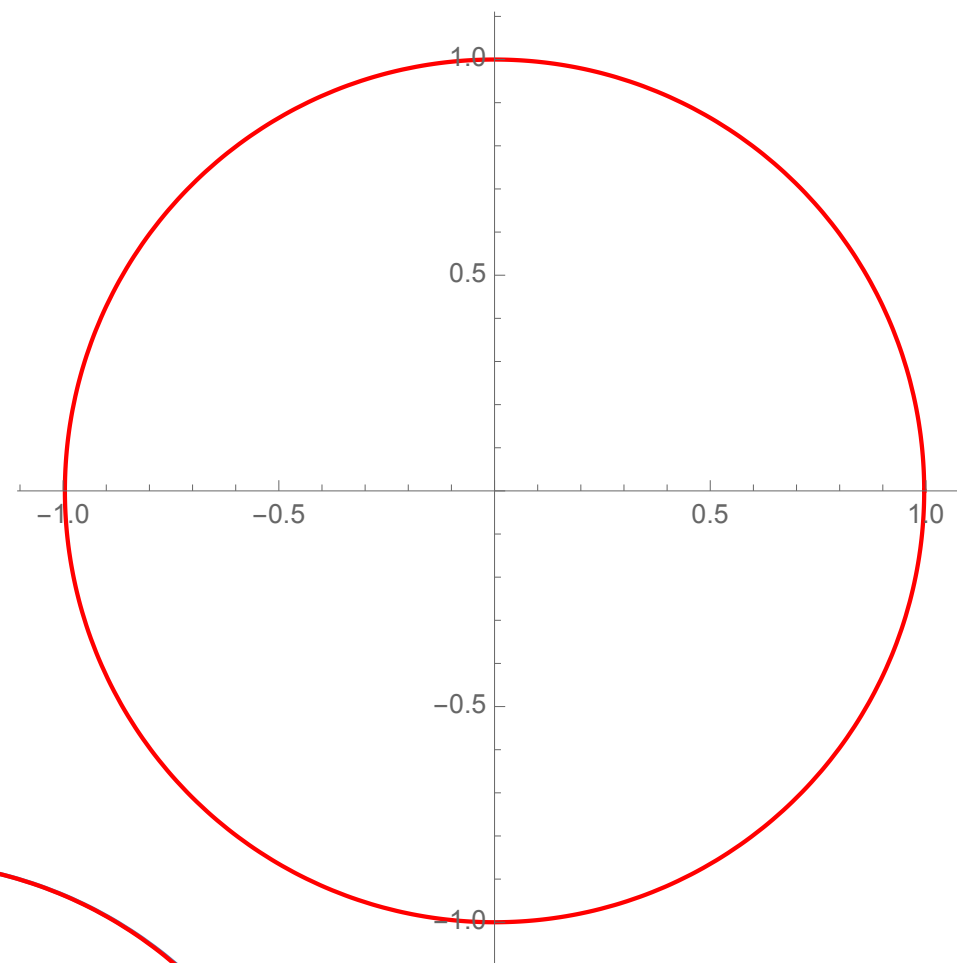
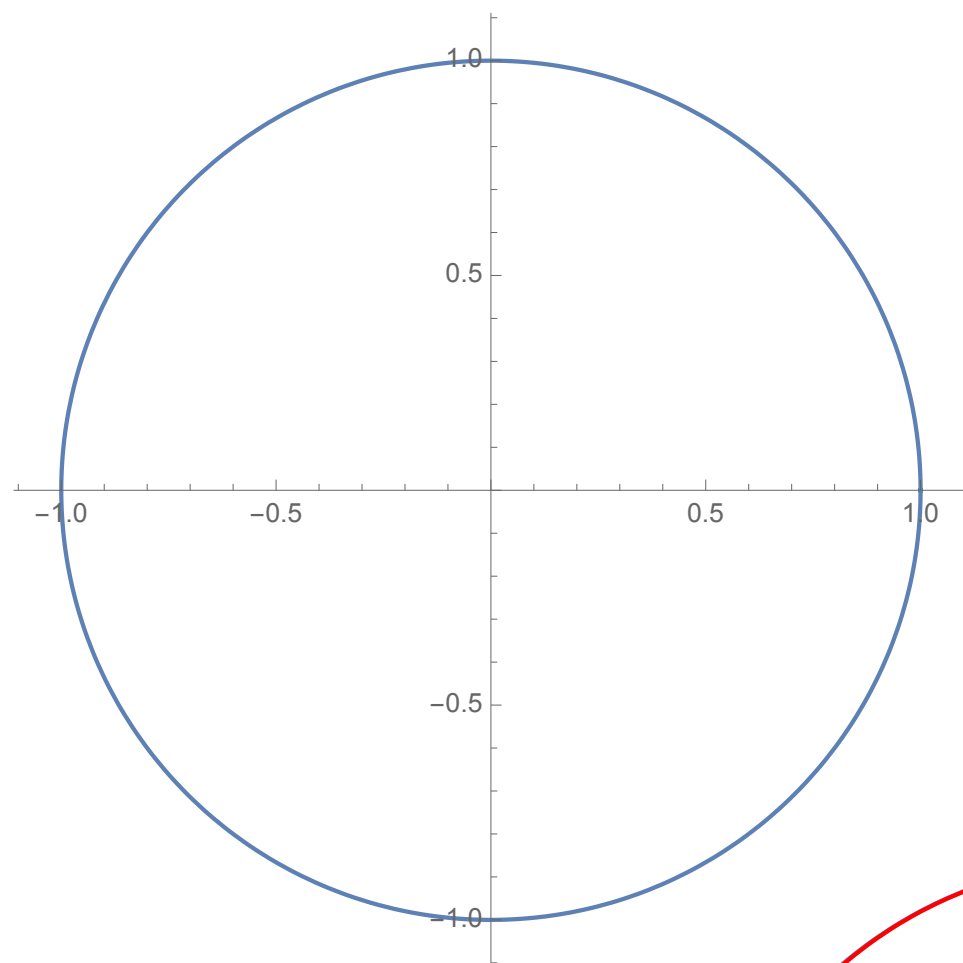


ケプラーの第一法則



円

離心率0.09の円（火星）



重ね合わせ

ケプラーによる惑星の運動法則（1609 年, 1619 年）

第 1 法則 楕円軌道の法則

惑星は太陽を 1 つの焦点とする楕円軌道を描く.

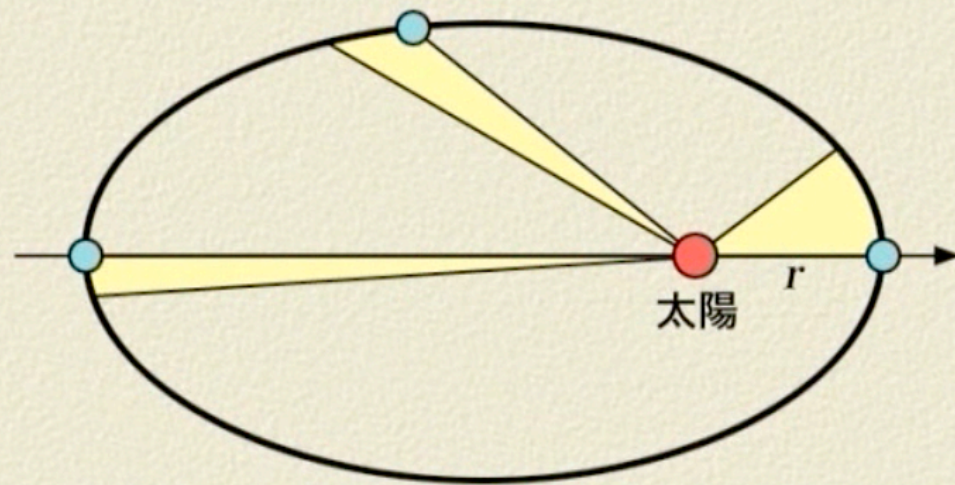
第 2 法則 面積速度一定の法則

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積（面積速度）は、惑星それぞれについて一定である.

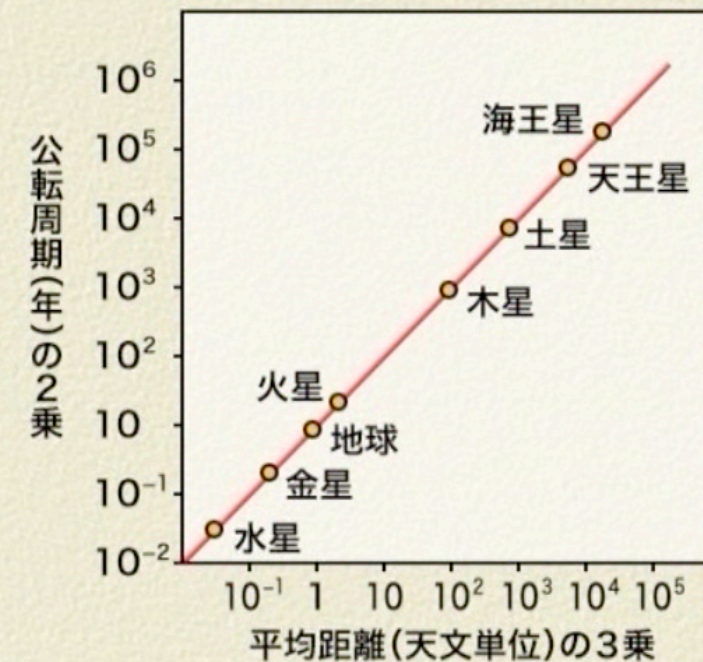
第 3 法則 調和の法則

惑星の公転周期 T の 2 乗と、惑星の描く楕円の長軸半径（長軸の長さの半分） R の 3 乗の比 T^2/R^3 は、惑星によらず一定である.

ケプラーの第二法則



ケプラーの第三法則



1. ニュートン力学

ニュートン : リンゴはなぜ落ちる？



<http://hikingartist.com/>



運動方程式 (Newton第2法則)

力を加えると

重力 (万有引力)

摩擦力 (抵抗力)

抗力

弾性力

張力

浮力

大気圧の力

電気の力

磁石の力

.. ..

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

大きさだけでなく、
向きを含めて成り立つ

加速度が生じる

速度がわかる

位置がわかる

運動がわかる！

等速直線運動

等加速度直線運動

放物運動

円運動・楕円運動

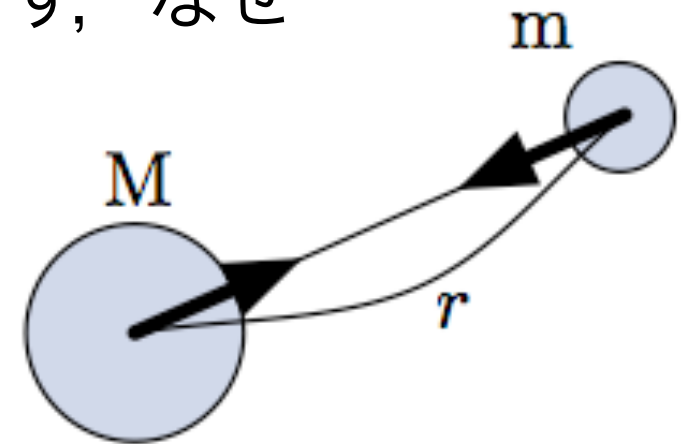
単振動

減衰振動

.....

なぜ月は地球に落下してこないのか

万有引力を考えると、すべての物体は近づいてゆくように思える。地球と月も万有引力で引っ張り合っているのにも関わらず、なぜ月が地球に落下してこないのだろうか。



1. ニュートン力学

ニュートン : 万有引力の法則



<http://hikingartist.com/>

万有引力の法則

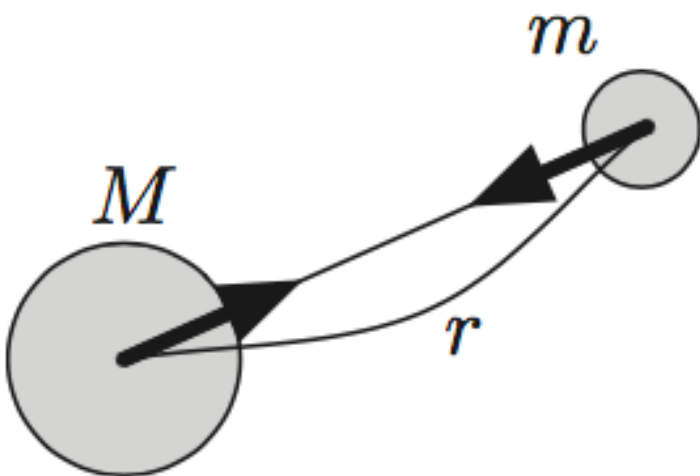
すべてのものは、引力で引き合う

◆ Advanced 万有引力の法則

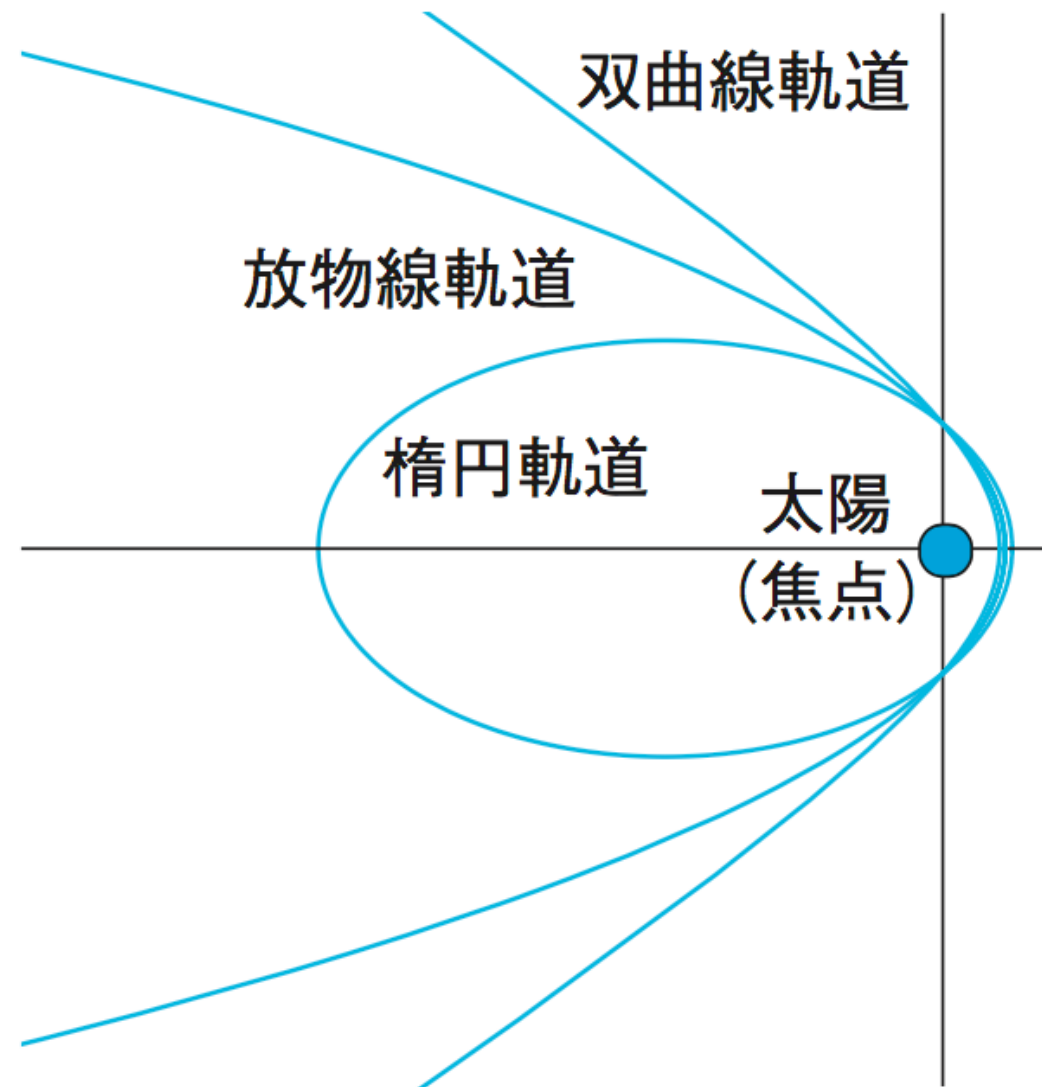
質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

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

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



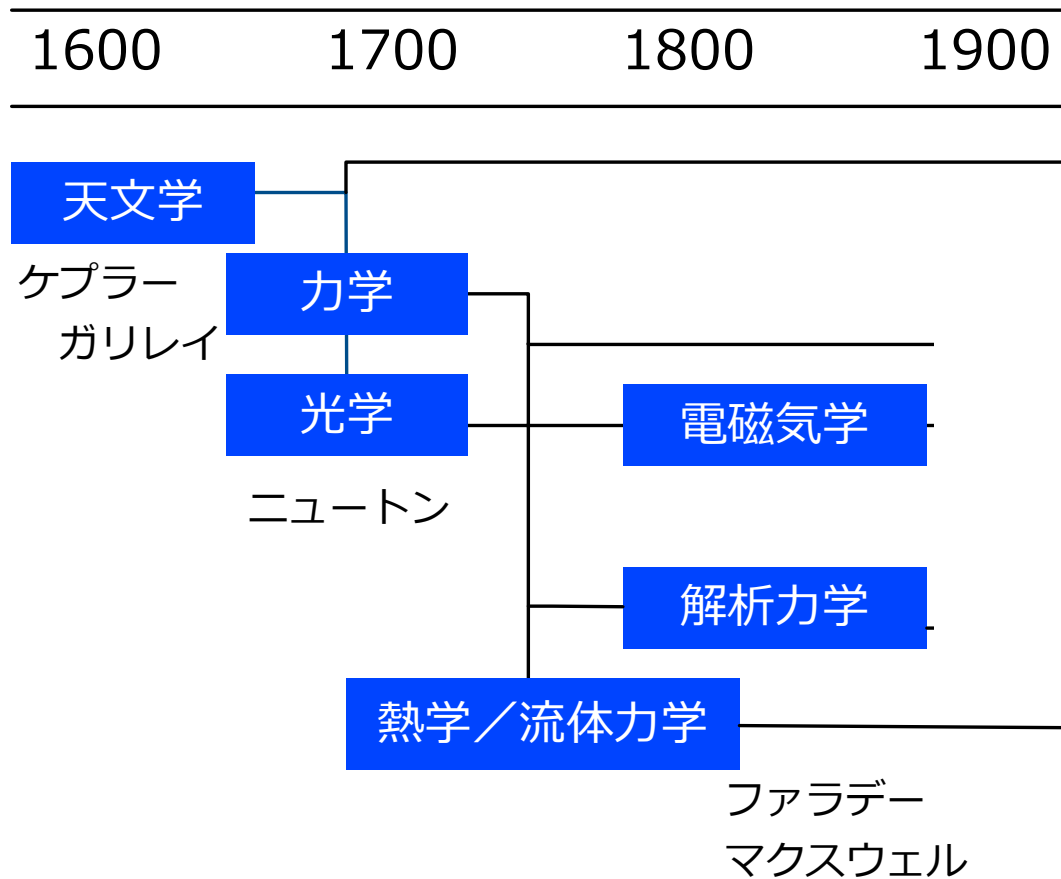
万有引力の法則＋運動方程式



太陽の重力圏にとどまるならば、
楕円運動するのが自然である。

1905年 物理学 奇跡の年

近代物理学の進展



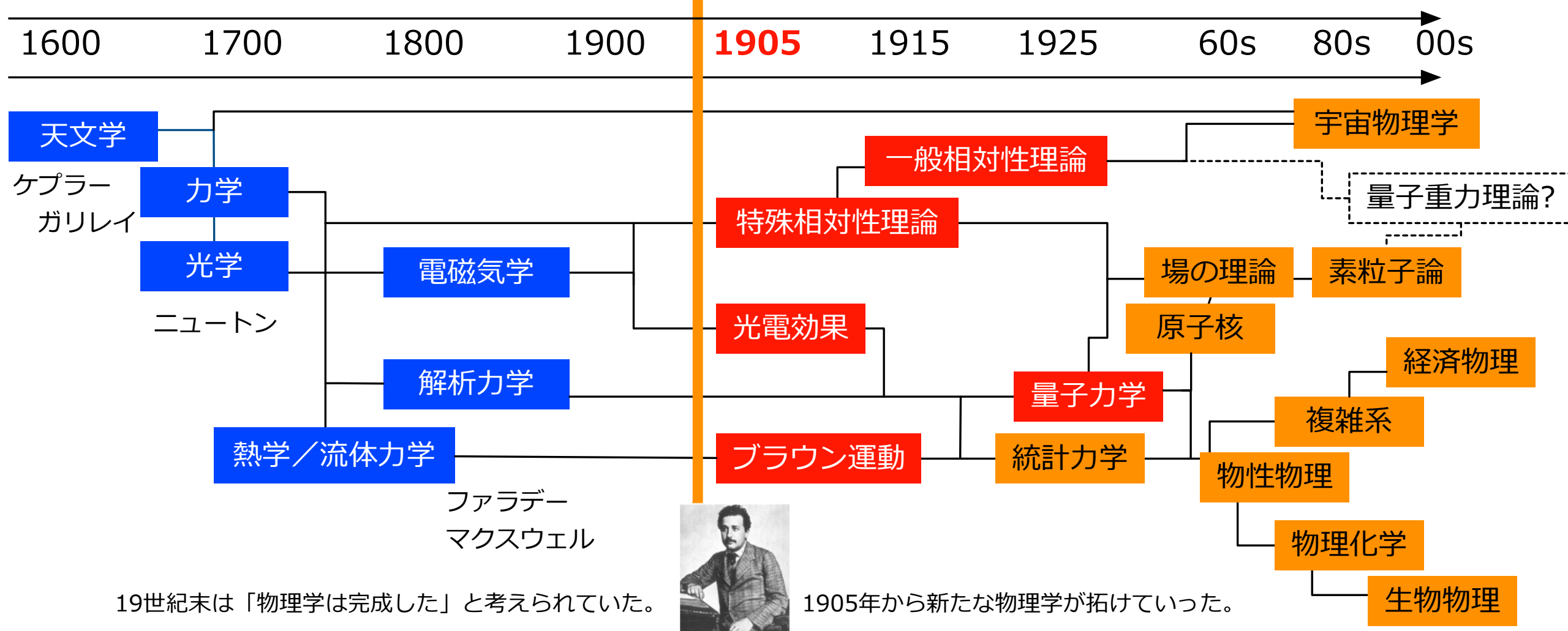
19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

2. 相対性理論

1905年 物理学 奇跡の年

近代物理学の進展

現代物理学の進展



特殊相対性理論 (1905年)

◆ Advanced マクスウェル方程式

マクスウェルがまとめた電磁気学の方程式は次の4本の式から成り立つ。
 $\mathbf{E}$ は電場ベクトル, $\mathbf{B}$ は磁場ベクトル, ρ は電荷密度, $\mathbf{j}$ は電流ベクトル,
 c は光速とする. また, ∇ は微分演算子とする.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (2.8)$$

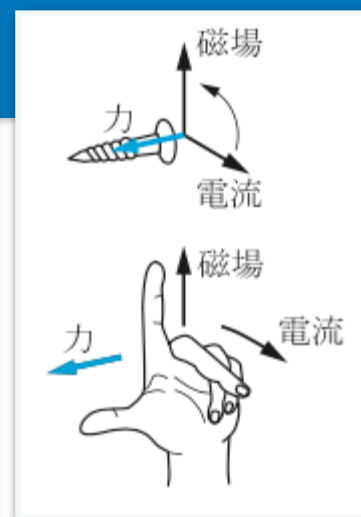
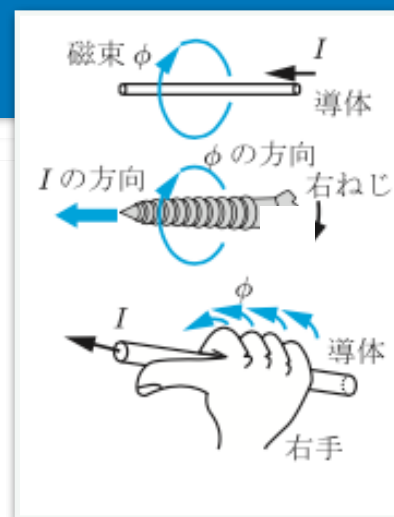
$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \quad (2.9)$$

具体的には, 各ベクトルは

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}, \quad \nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

などと書け, $\cdot$ と $\times$ はベクトルの内積と外積を表す. したがって, 以下のようになる

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$



電磁気学の基礎方程式

(Maxwell 方程式, 1864 年)

大学で理工系に進むと習う式.

なぜ基礎方程式に光速 c が登場するのか?
速度は, 観測する人との相対的なもののなのに.

誰から見ても光速は同じ値だと考えよう.

時間の進み方は, 運動状態によって変わる, と
考えれば良い



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)

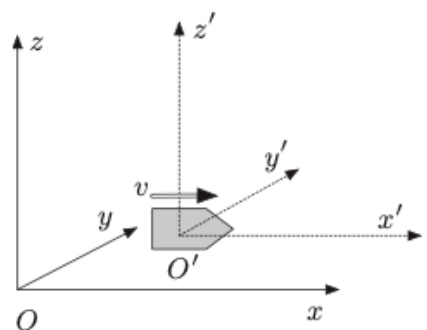


図 3.10 静止している xyz 座標系と、速度 v で x 方向に動いている $x'y'z'$ 座標系。

◆ 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

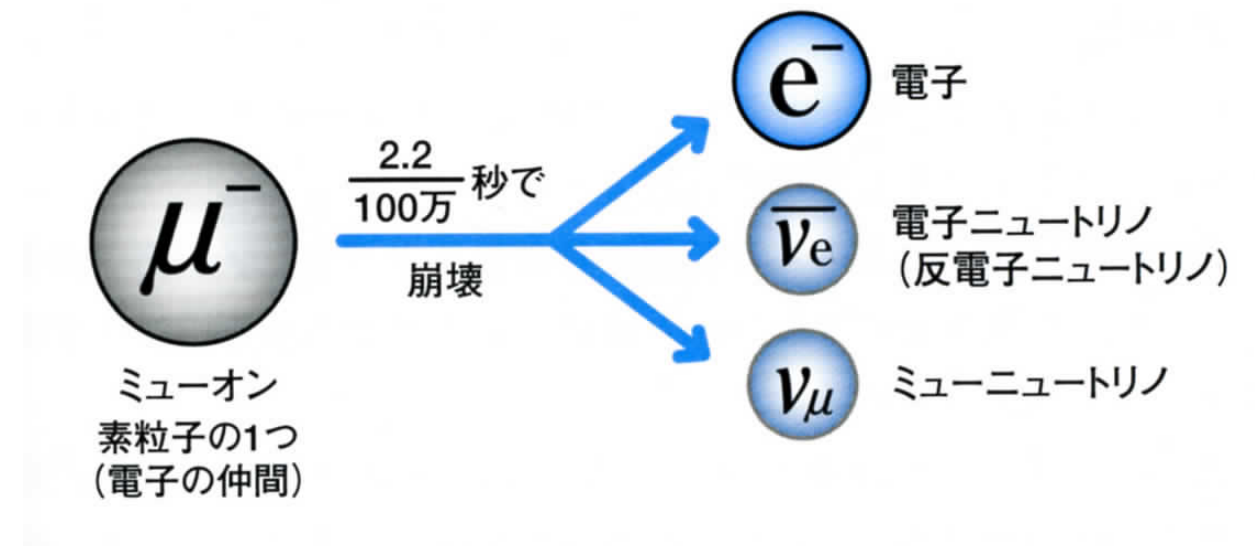
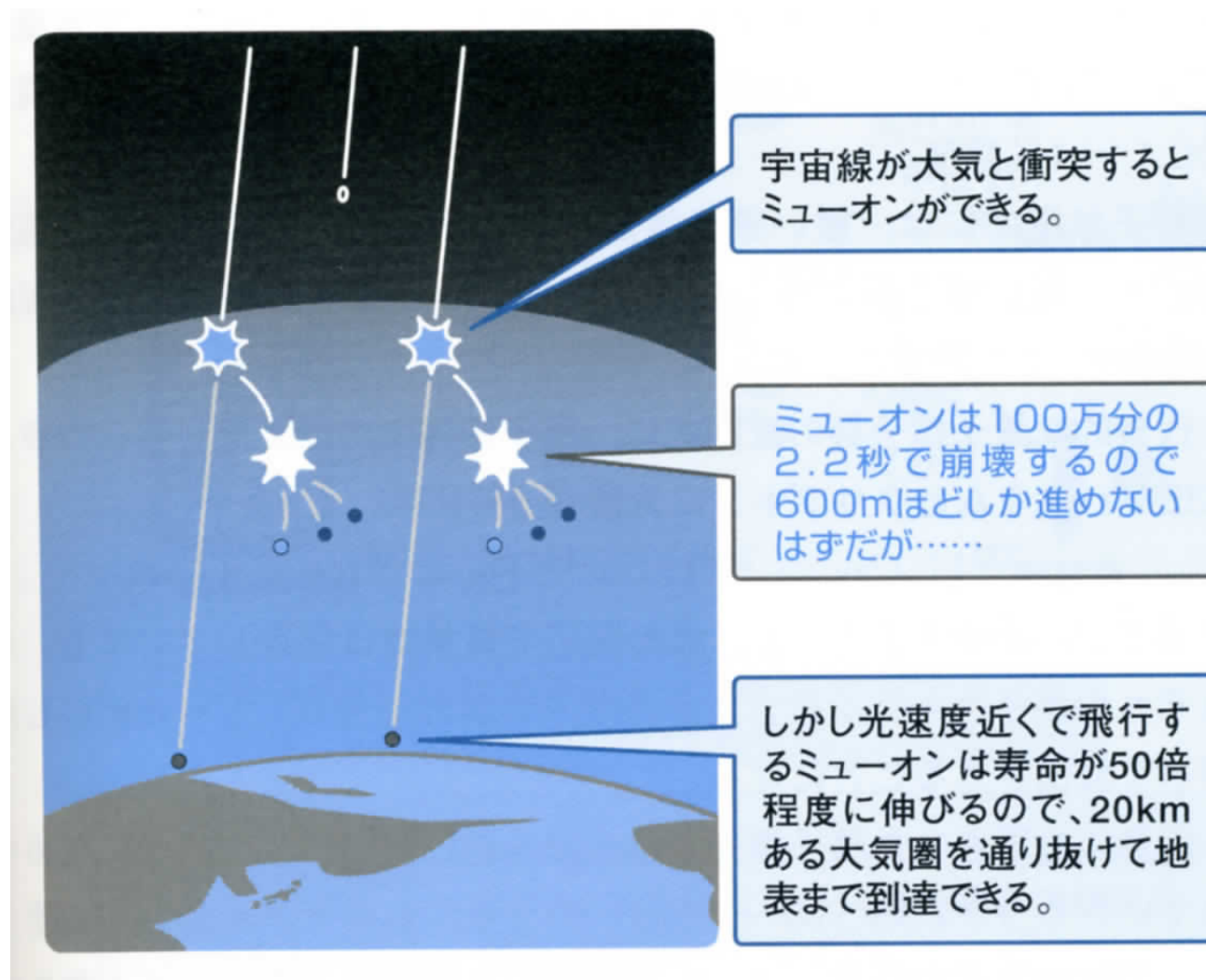
静止質量エネルギー (エネルギーと質量の等価性)

$$E = mc^2$$

静止質量エネルギー (1905 年)
(エネルギーと質量の等価性)

エネルギー保存則を4次元で考えると、
質量そのものがエネルギーだ。

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

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

$$F = ma$$

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

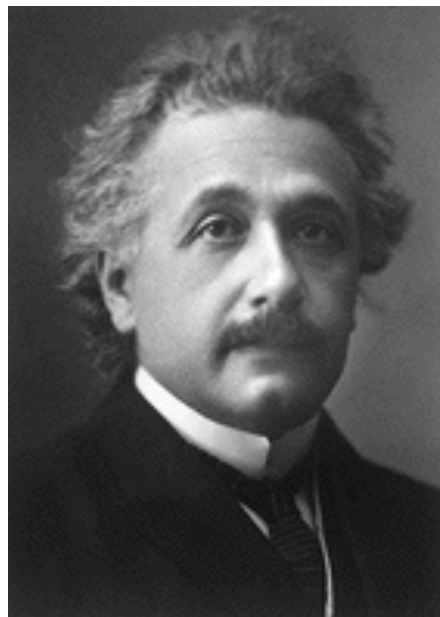
光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

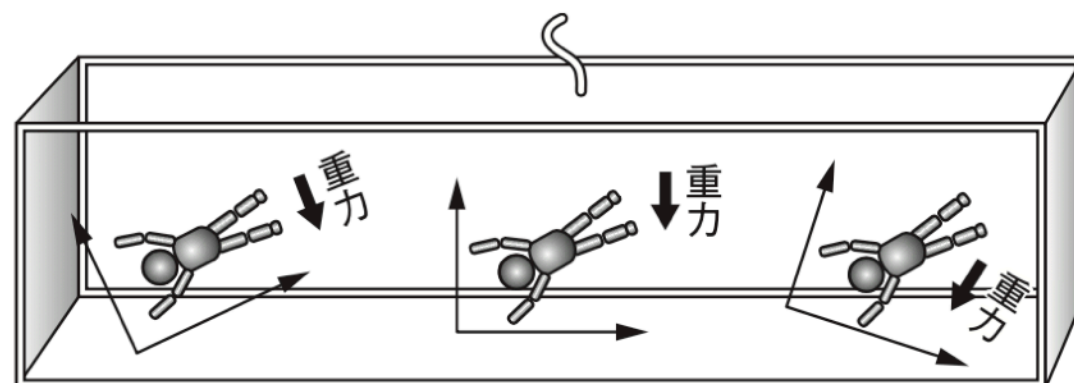
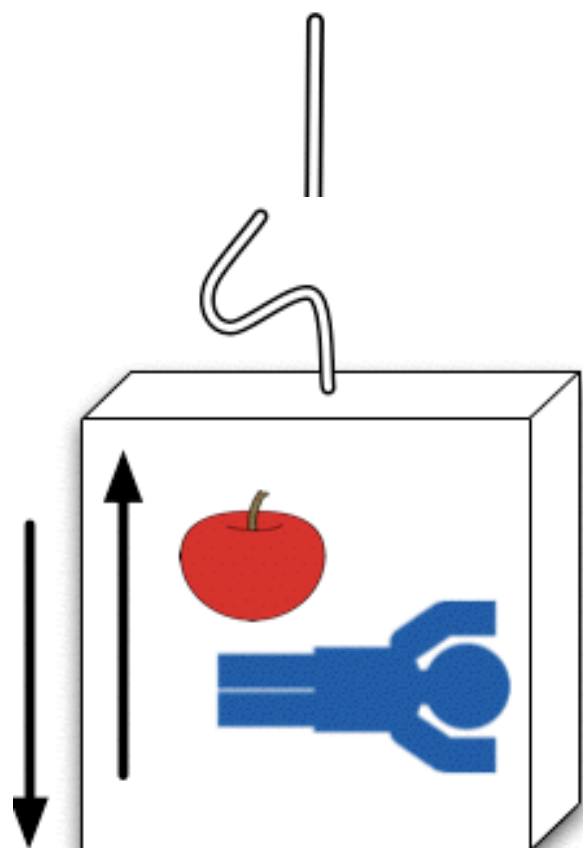
一般相対性理論 (1915年)



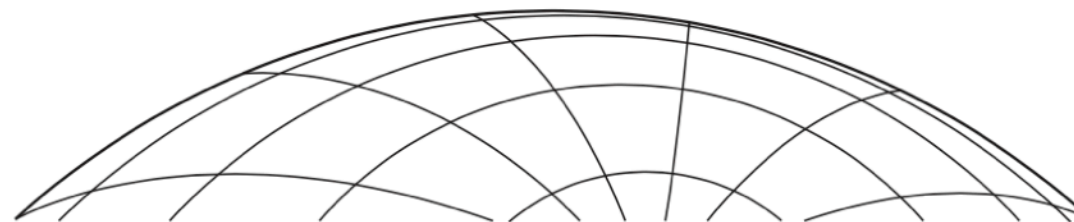
1905年の相対性原理では、等速運動しか扱っていない。
加速度運動する場合の相対性理論はどうなるだろうか。

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しない。
重力の局所的には消すことができるが、大域的には消せない。



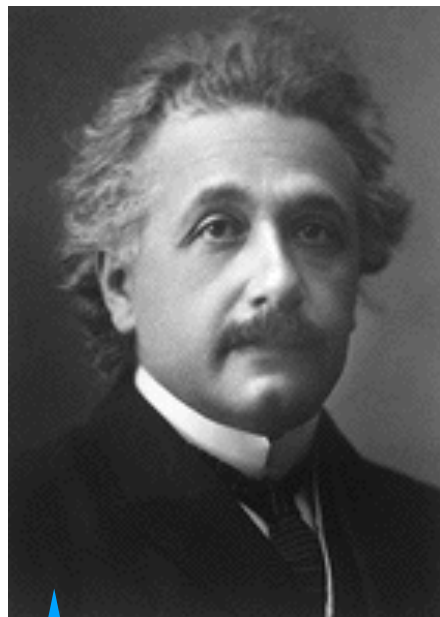
↓ 地球の半径ていどの大きさのエレベータだと重力の向きがちがうので、全体で重力を打ち消すことができない。 ↓



重力の正体は、空間の性質だ

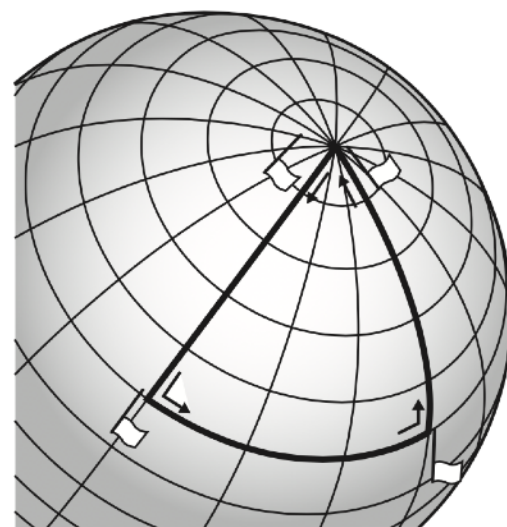
空間のゆがみが
重力の正体だ

一般相対性理論 (1915年)



重力の正体は、空間の性質だ

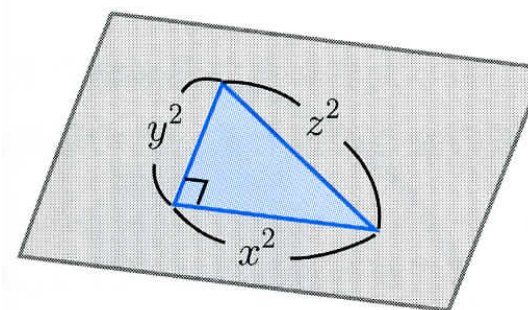
空間のゆがみが
重力の正体だ



正の曲率 (地球表面)

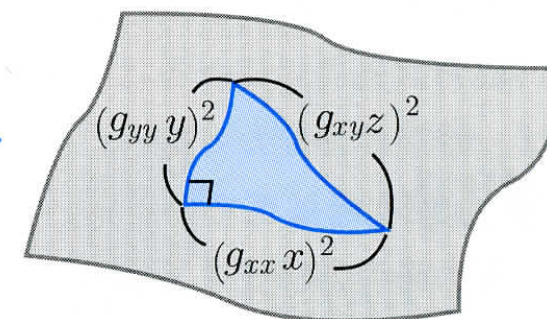
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



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

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



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

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

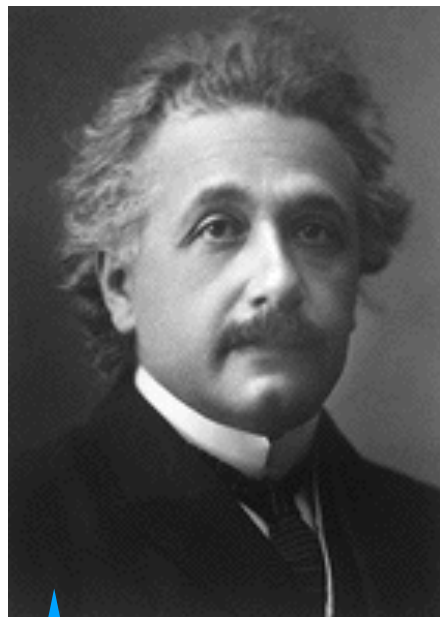
重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915 年)

重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

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

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

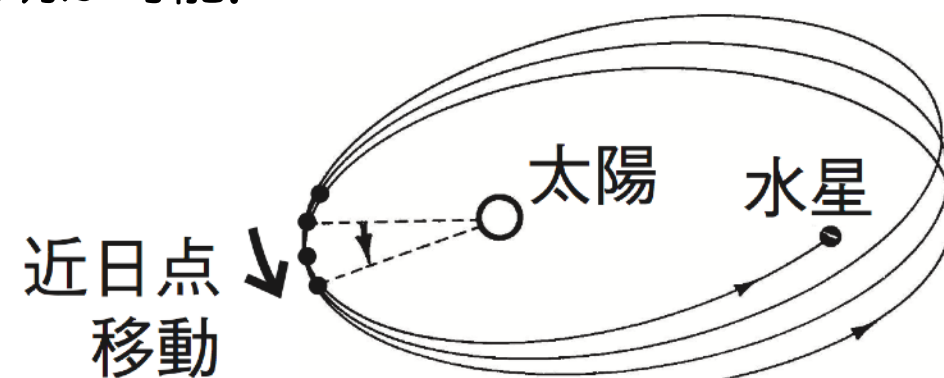
一般相対性理論が説明するもの



水星の近日点移動の問題 (ルベリエ, 1854)

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

残りの43秒は???



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

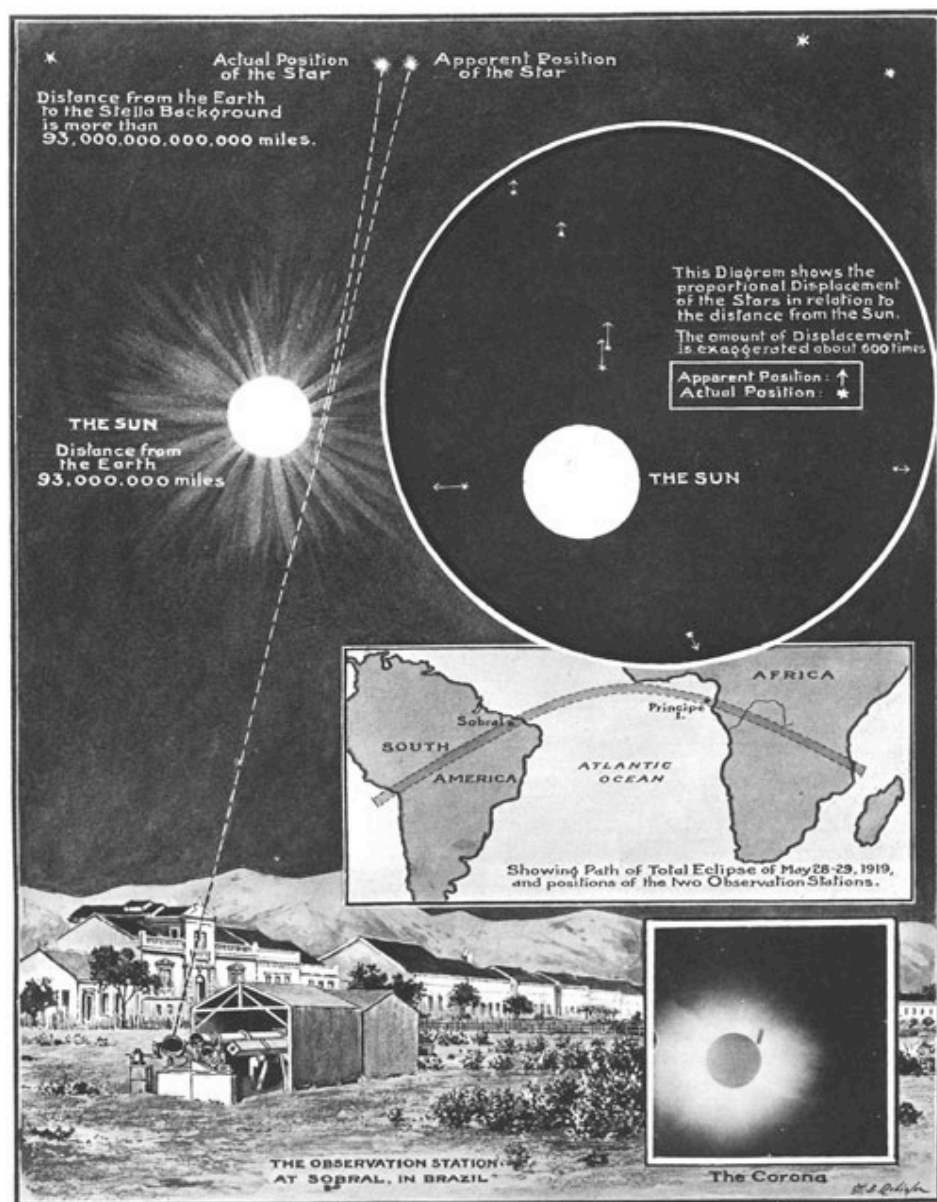
1915年, アインシュタインが, できたばかりの一般相対性理論を適用すると, 「43秒の歳差運動」が出てきた.

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

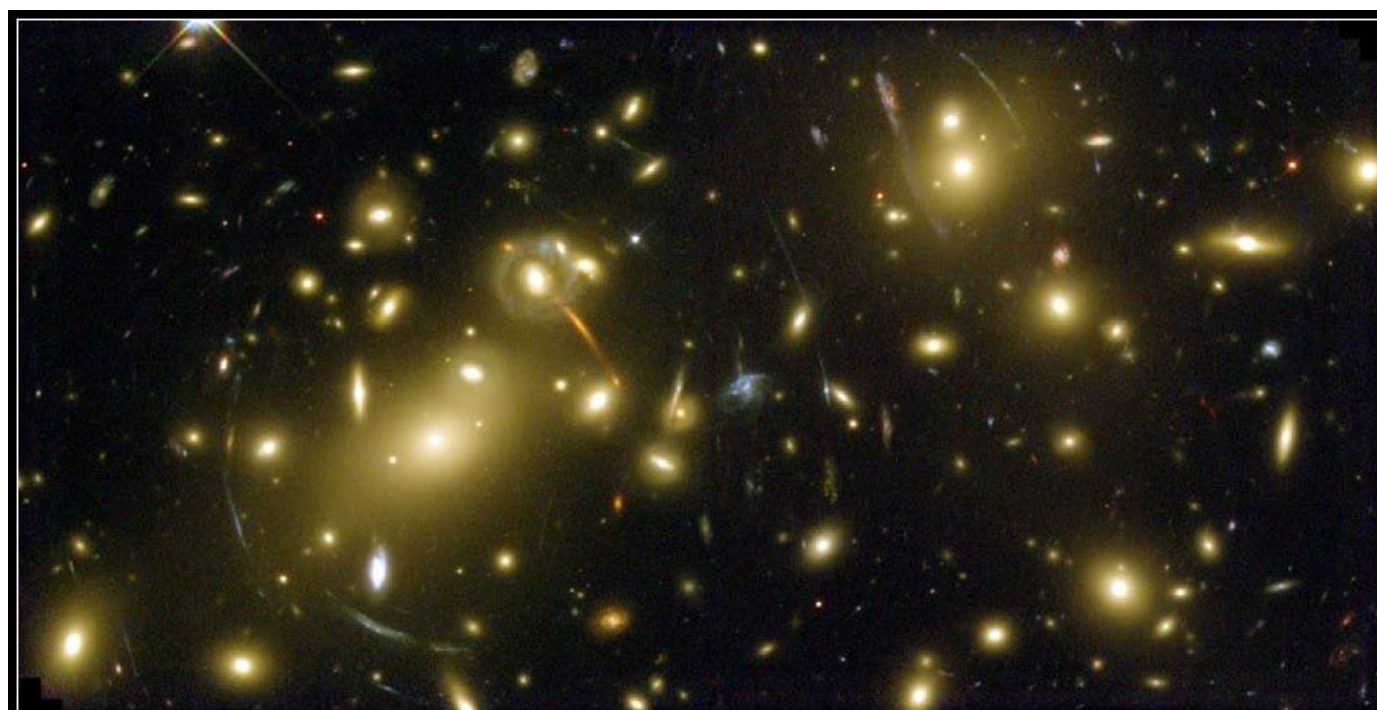
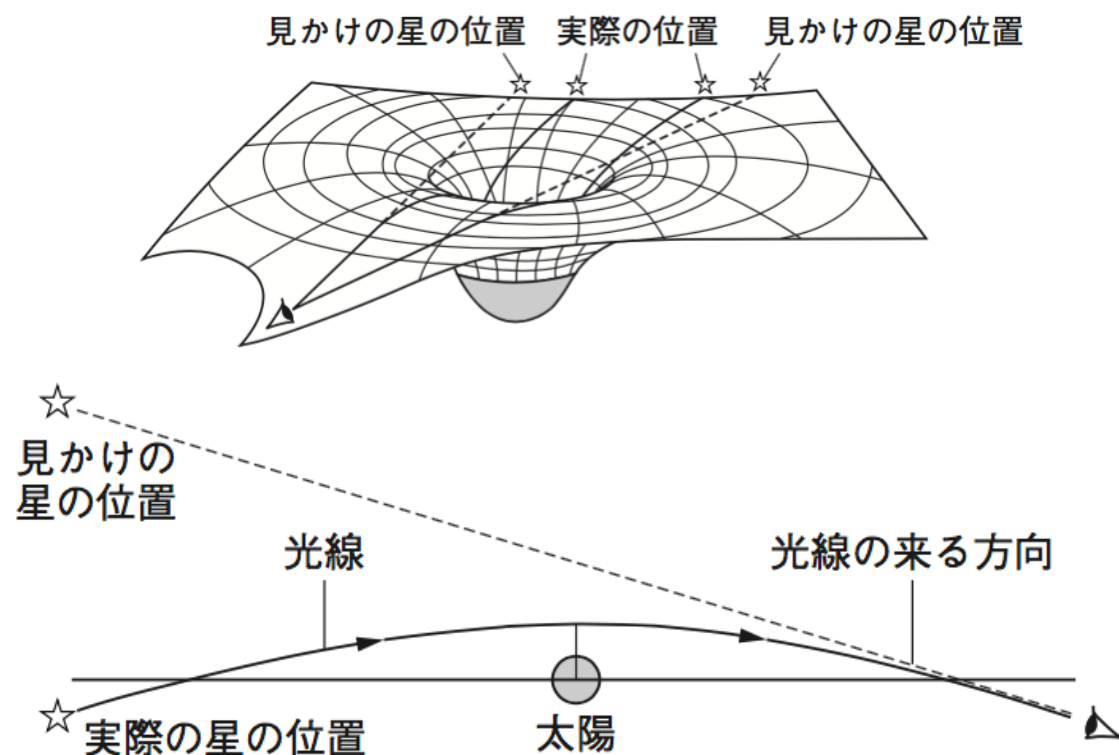
一般相対性理論が予言したもの

- 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▶



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

皆既日食で確認された。重力レンズ効果としても観測される。

- 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。

飛行機、人工衛星、地上での検証すすむ。

スカイツリー実験

- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける。

ブラックホールの存在

銀河中心のブラックホール

100年経っても計測されない
だろう

ブラックホールのような
特異点があるはずない

- 宇宙全体は動的でなければならない。

膨張宇宙

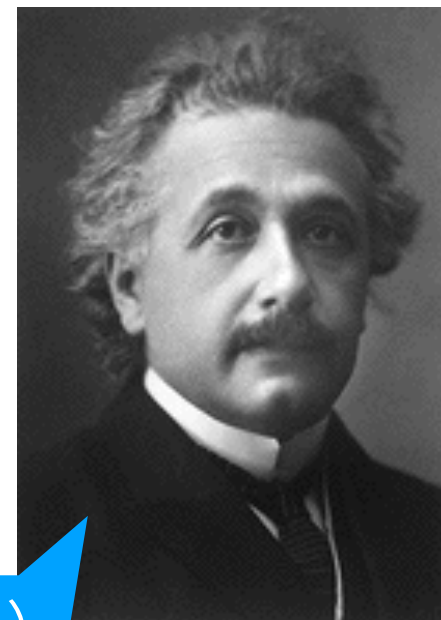
宇宙が膨張・収縮する
はずない

- 重力波が宇宙空間を伝わる

時空のさざ波の伝播

重力波観測

重力波なんて存在しないかも



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

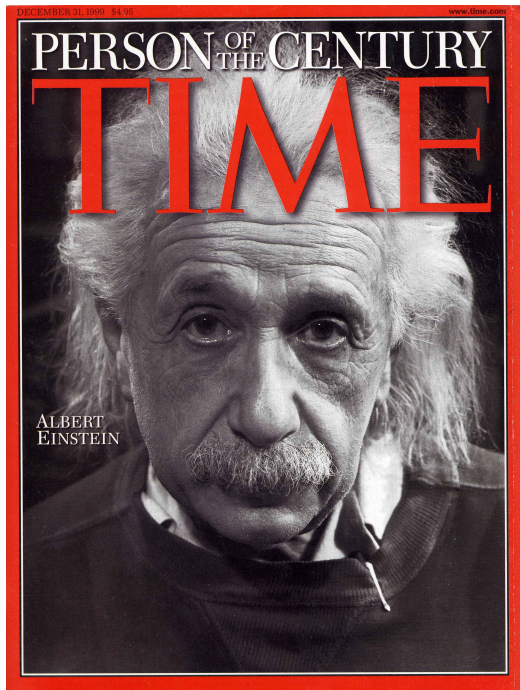
量子場の理論

究極の理論

未完成

アインシュタインはどこまで正しい？

検証が進む相対性理論



Time
1999/12/31

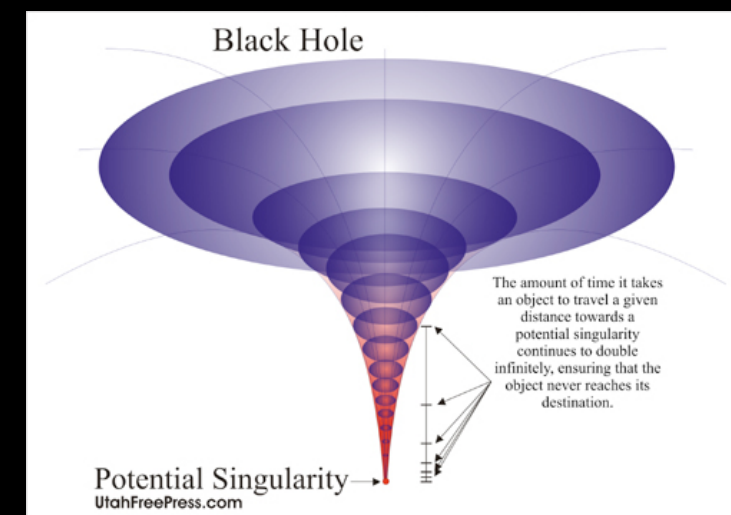
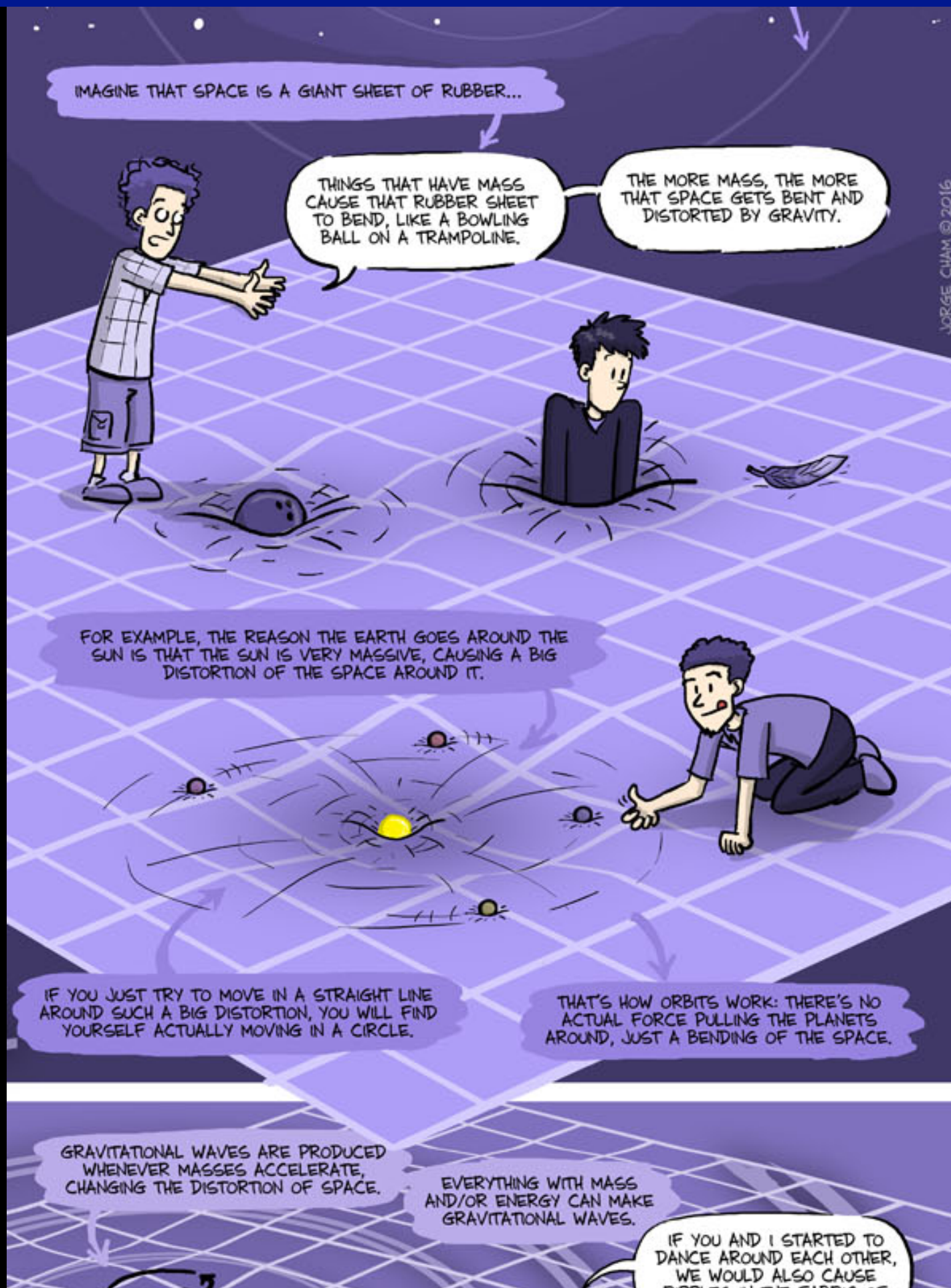
1. ニュートンの力学（1687年）
2. 2つの相対性理論（1905年, 1915年）
3. **ブラックホールの観測**
4. 重力波の検出
5. 時計を使った相対性理論の検証

真貝寿明（しんかい ひさあき）

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

2021/7/18 第11回高校生天文活動発表会



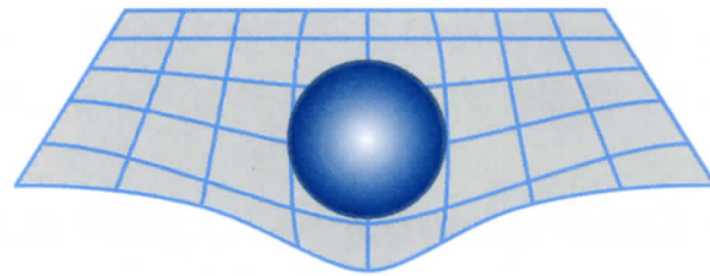


ブラックホール

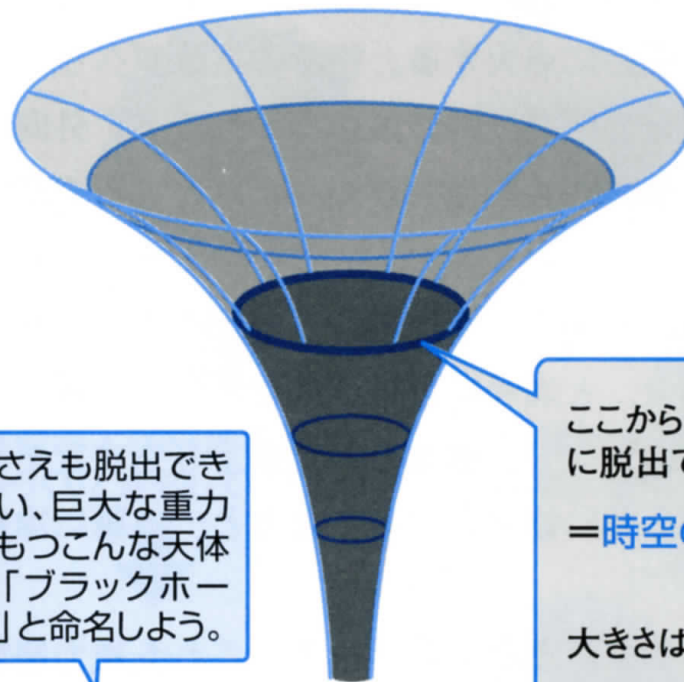
= 重力が強すぎて、光さえも出られない天体

= 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。

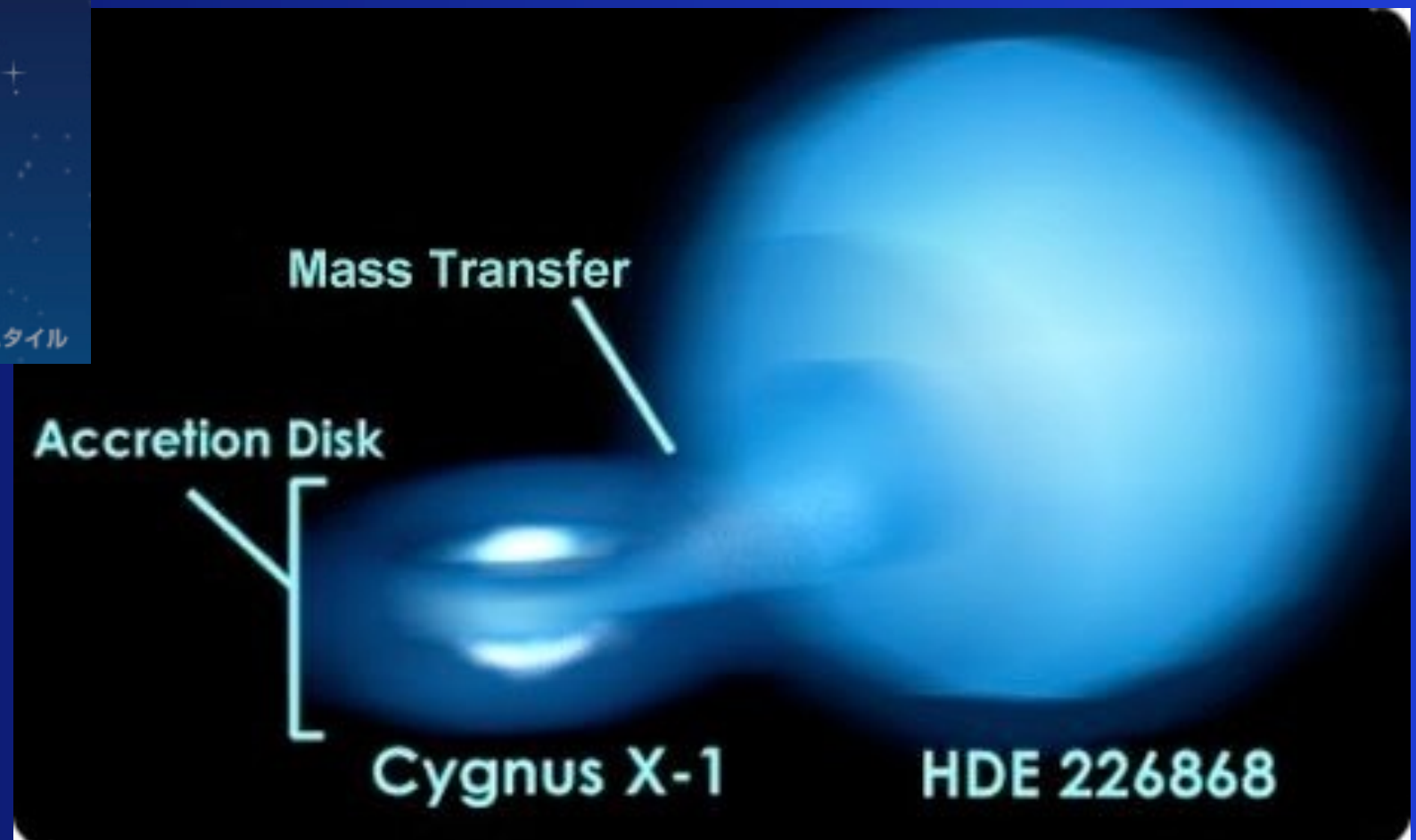
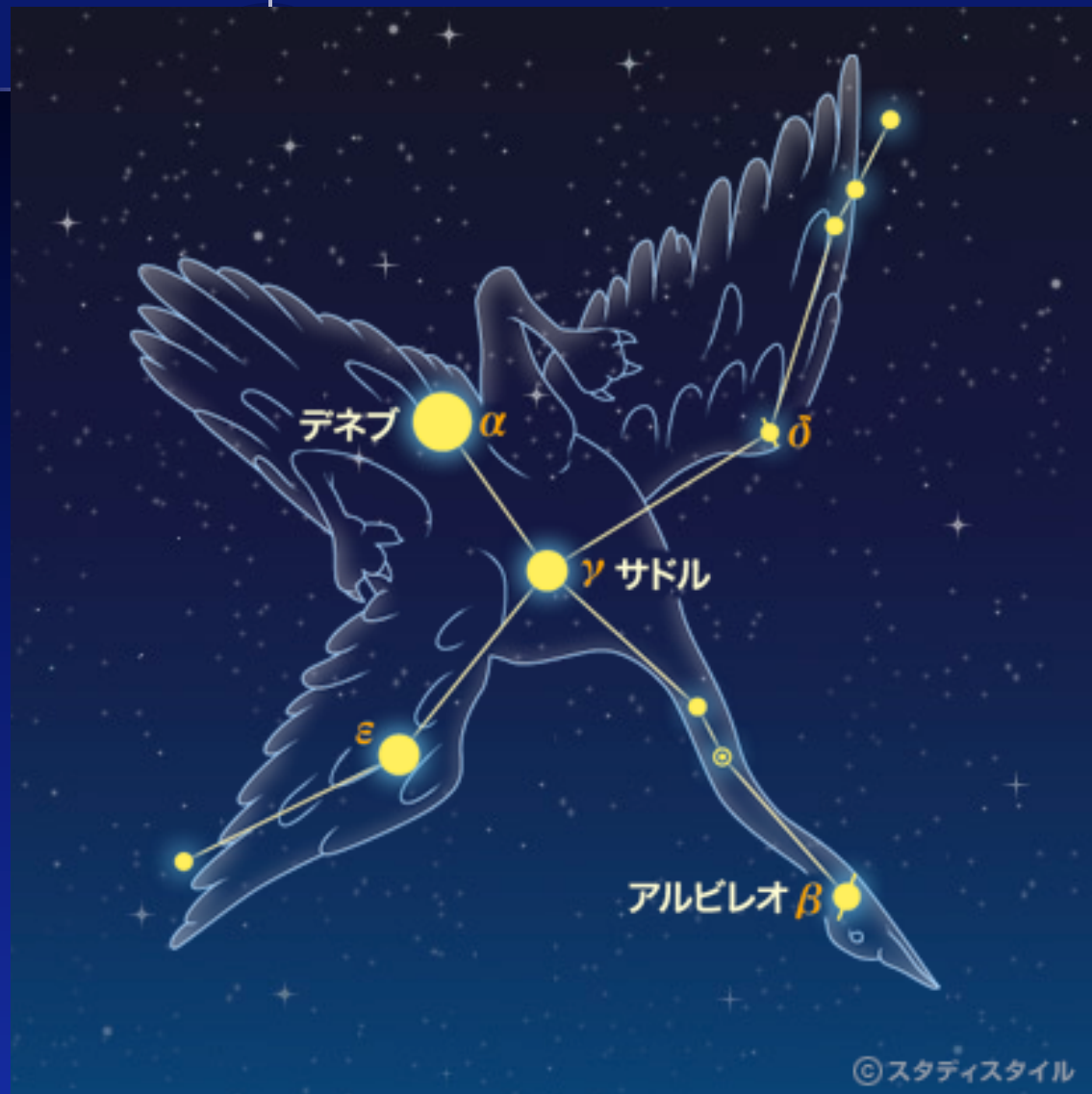
表 4.1: シュヴァルツシルト半径 (対応するブラックホールの大きさ). 質量 M の物体がどの位の半径 R_{Sch} に押し込まれたらブラックホールになるか, という目安. Sgr A* は天の川銀河中心の超巨大ブラックホール.

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



ホイーラー

はくちょう座 X-1はブラックホール



2020年のノーベル物理学賞 受賞者

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

“ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大

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

ラインハルト・ゲンツェル (68) 独マックスプランク研究所

アンドレア・ゲズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



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

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

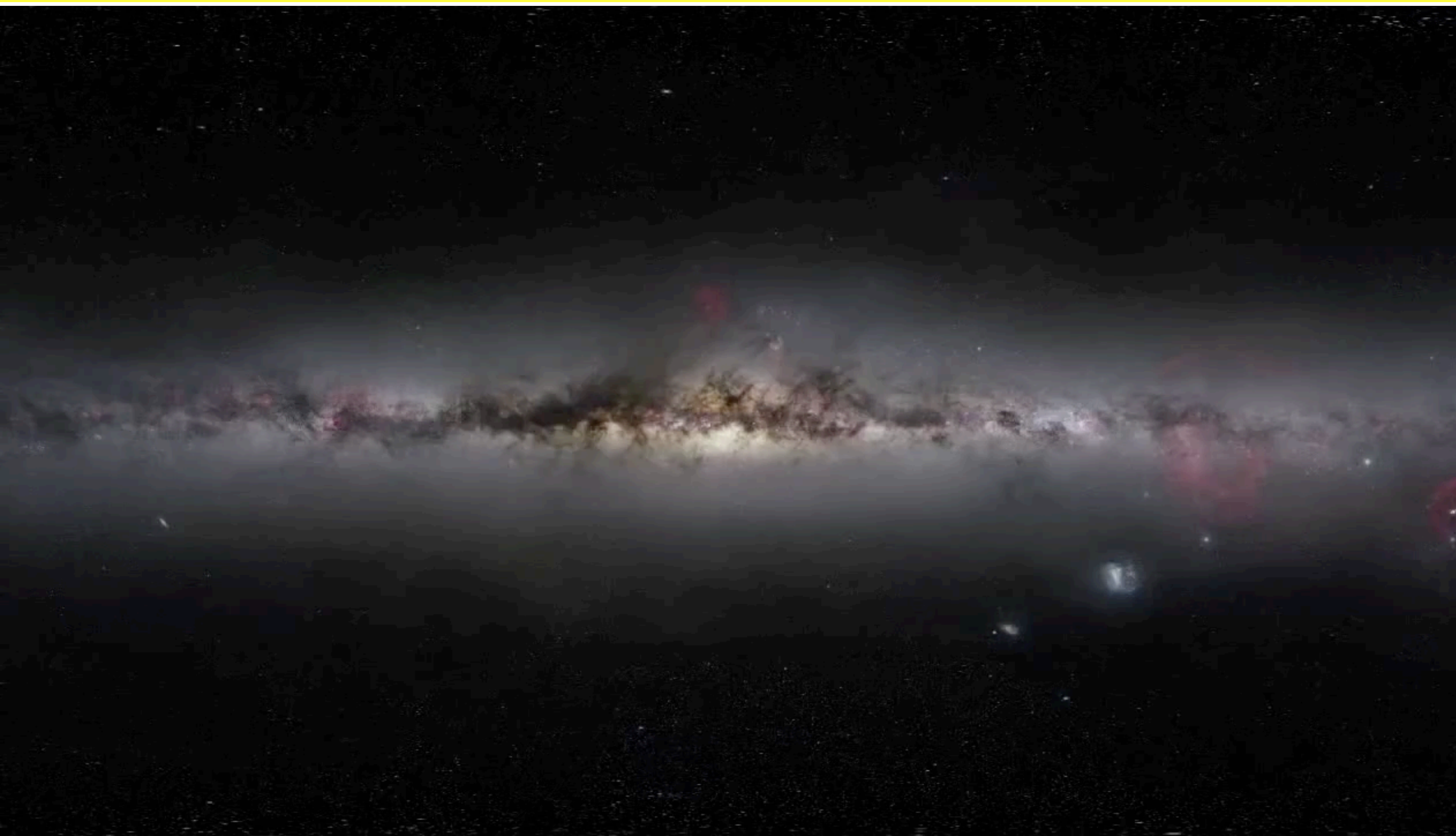




<http://shop.nationalgeographic.com/ngs/product/maps/wall-maps/space-maps/the-milky-way-map%2C-laminated>

<http://ernstgraphics.wordpress.com/page/2/>

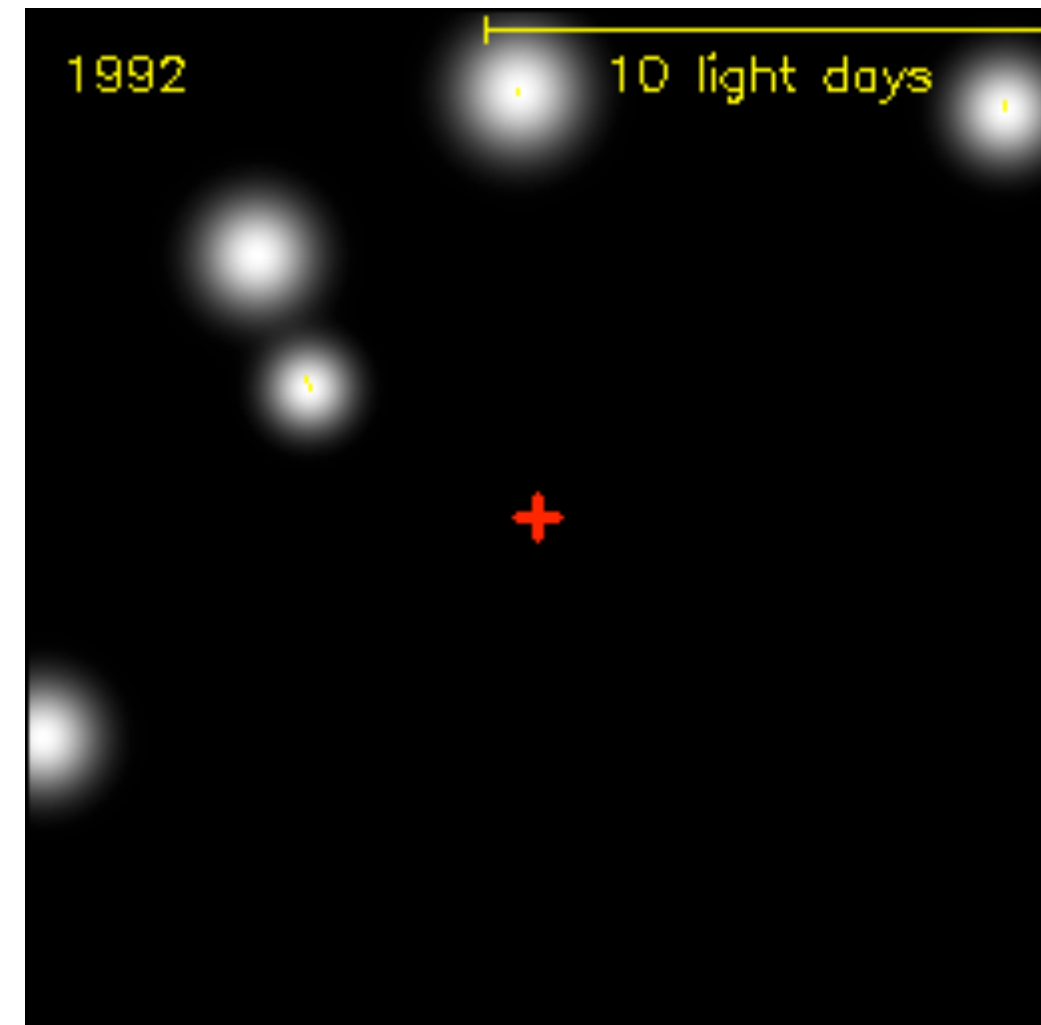
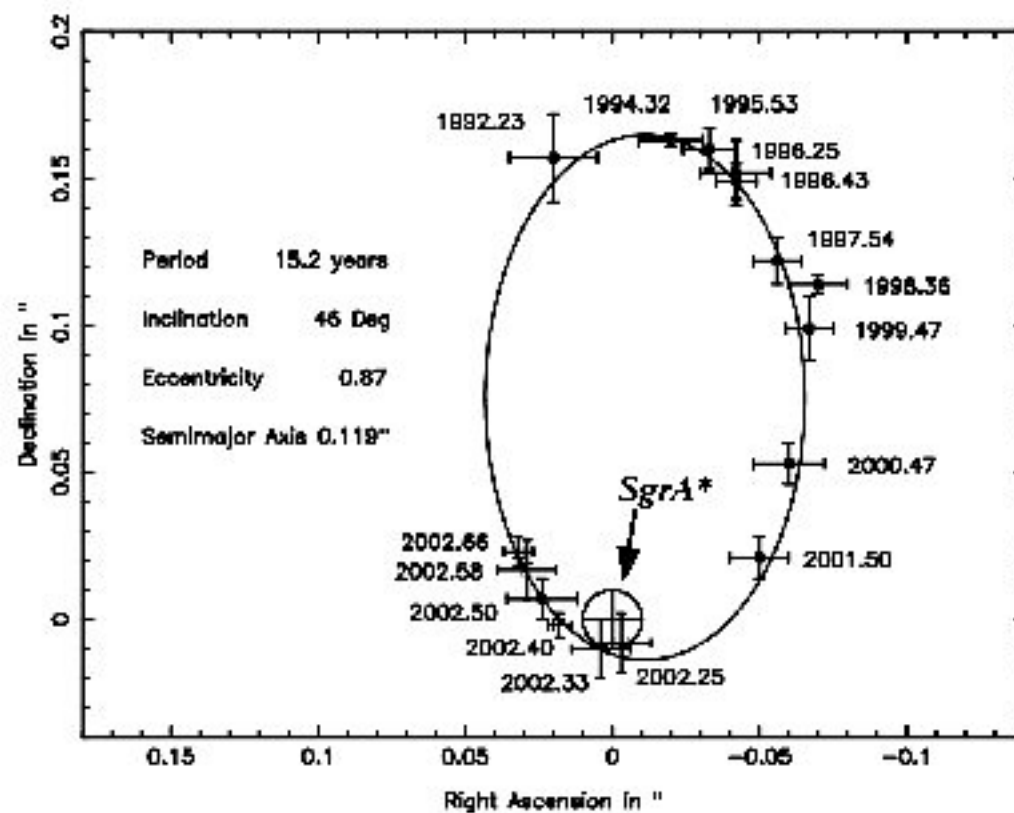
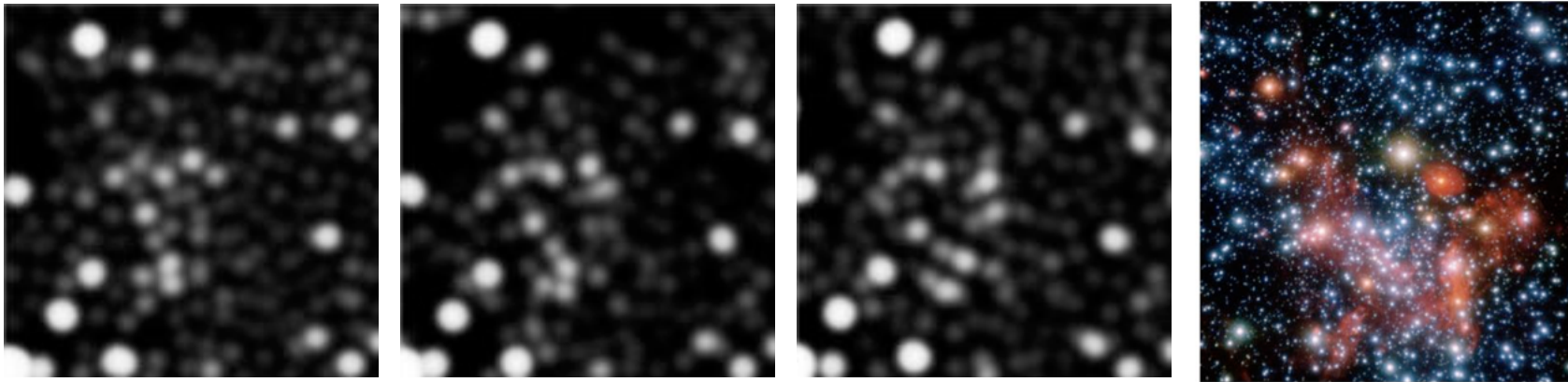
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

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

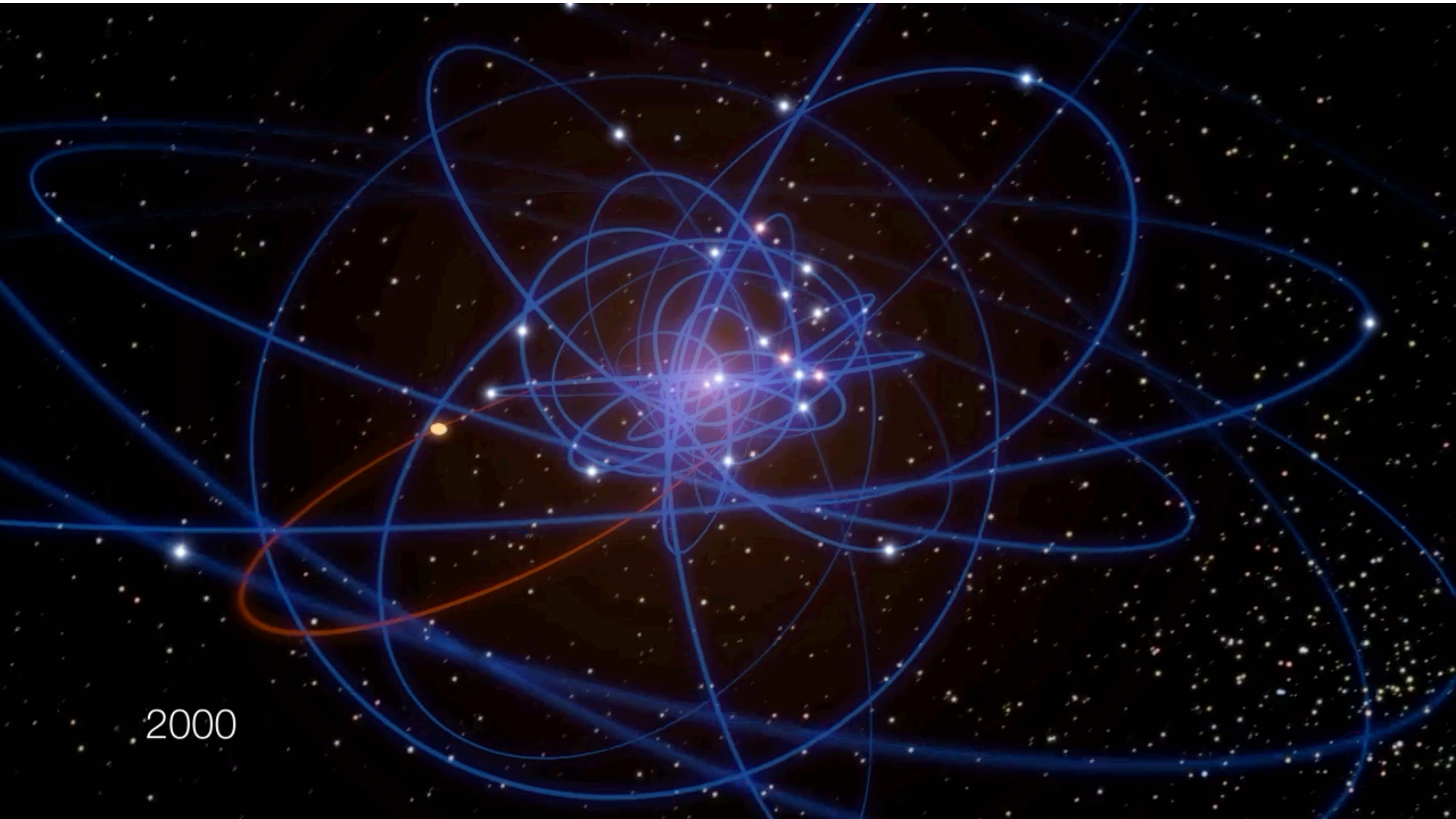
S2 orbit around Sgr A*



<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)

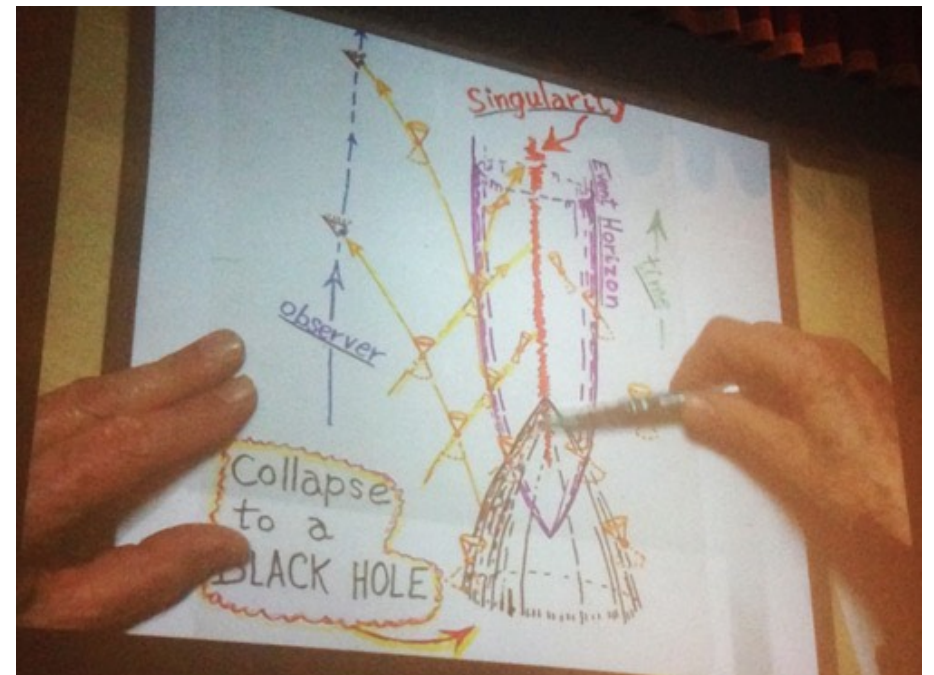
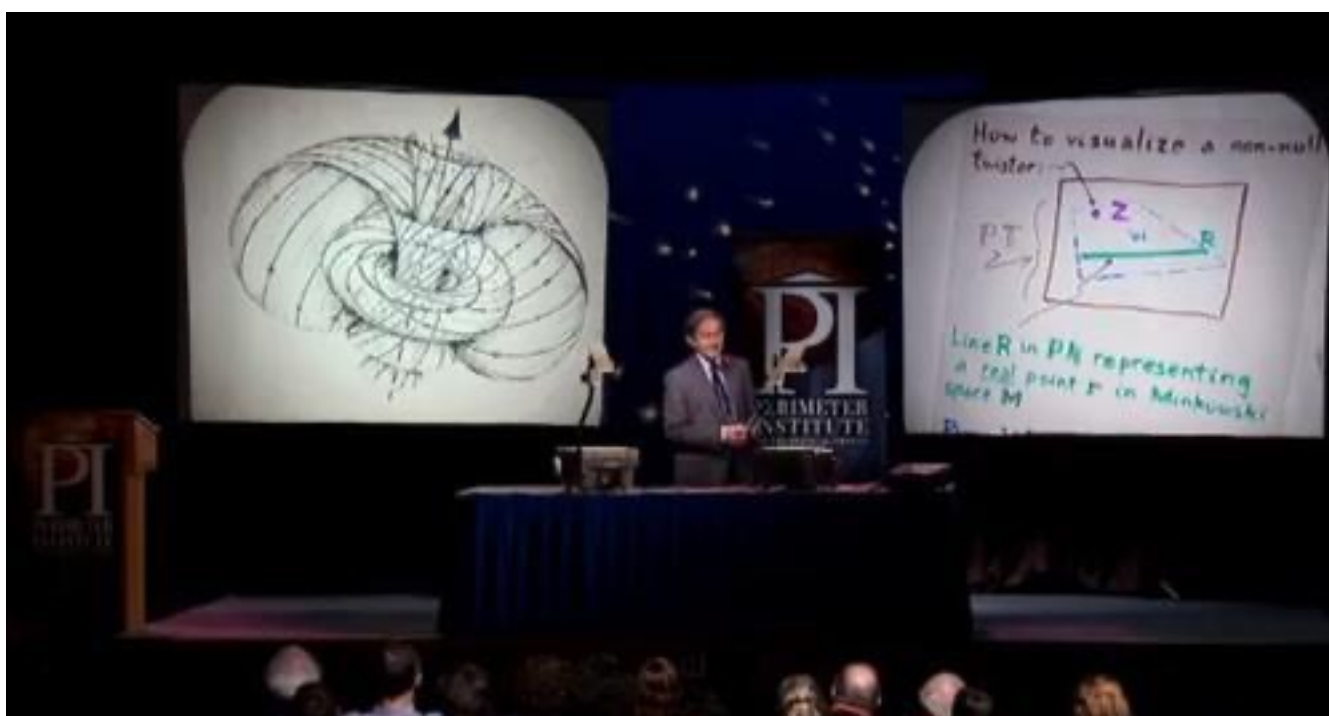
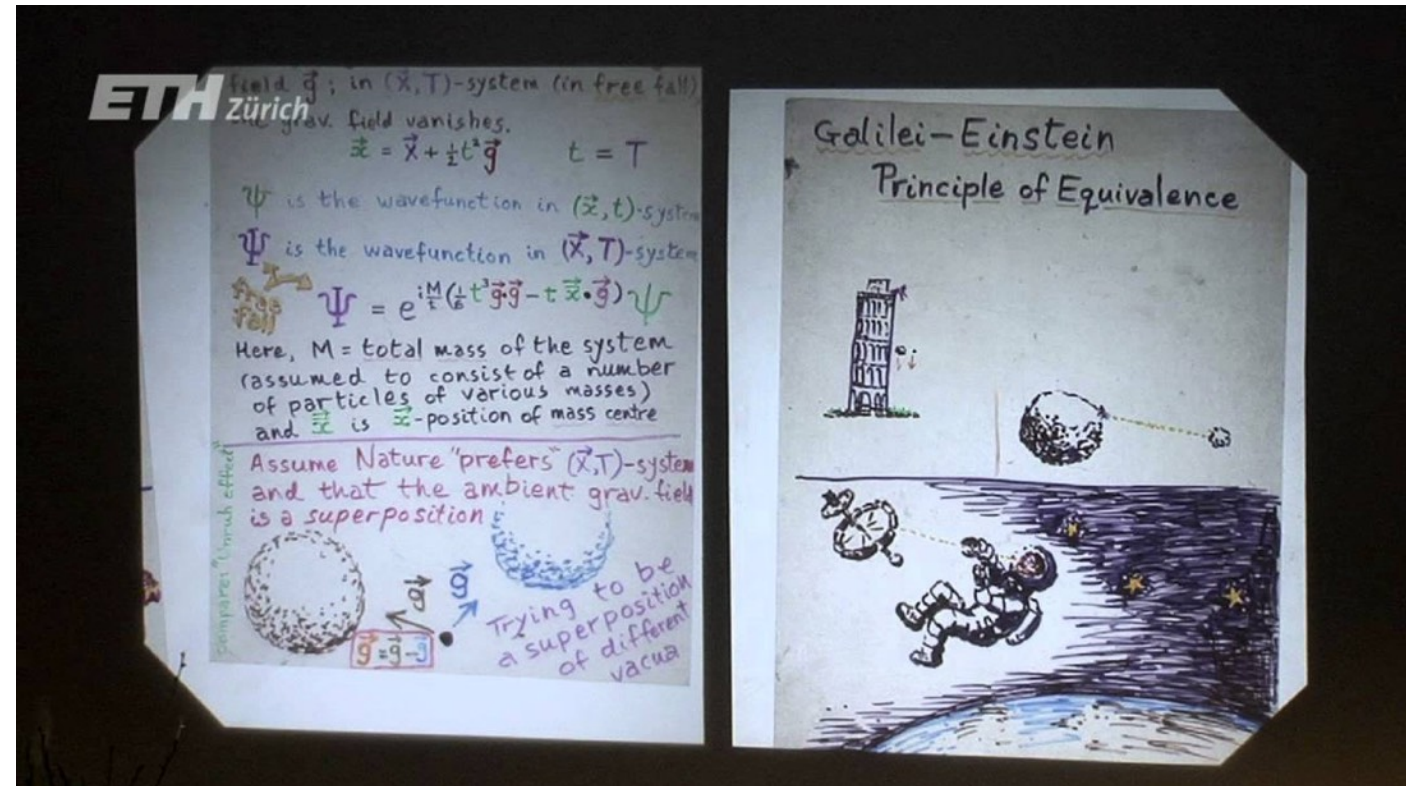
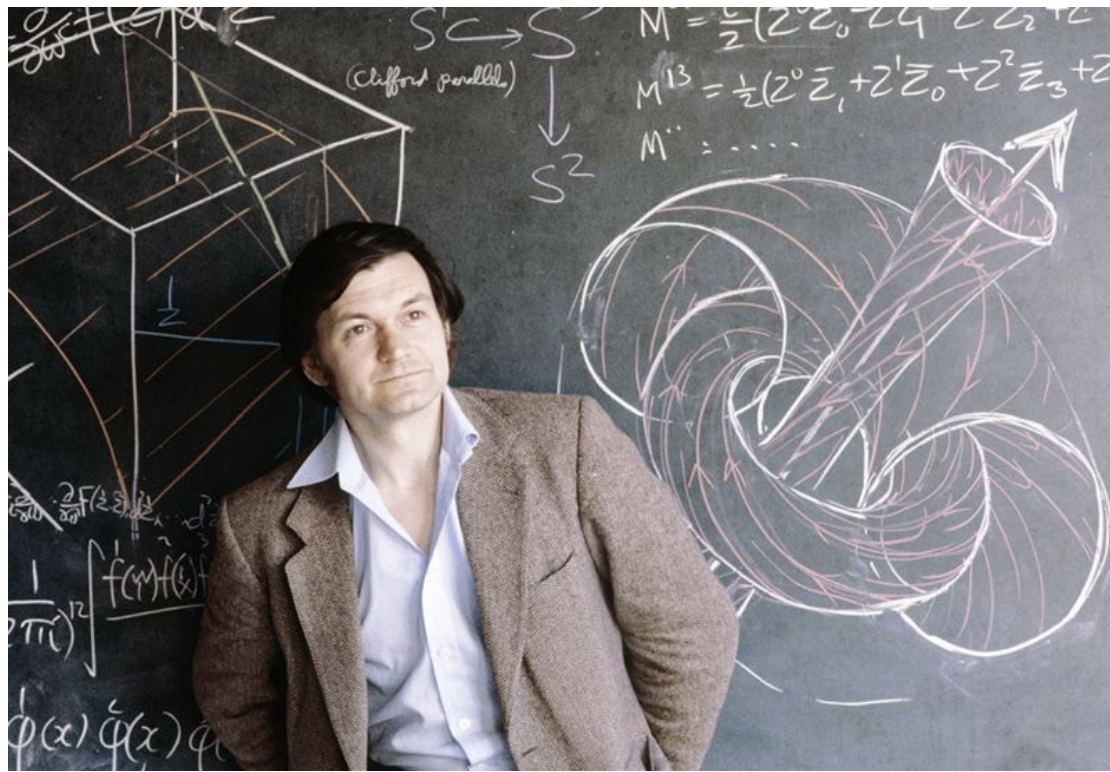


Reinhard Genzel and Andrea Ghez independently tracked the activity around the supermassive black hole at the Milky Way's center over a period of decades.

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

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」



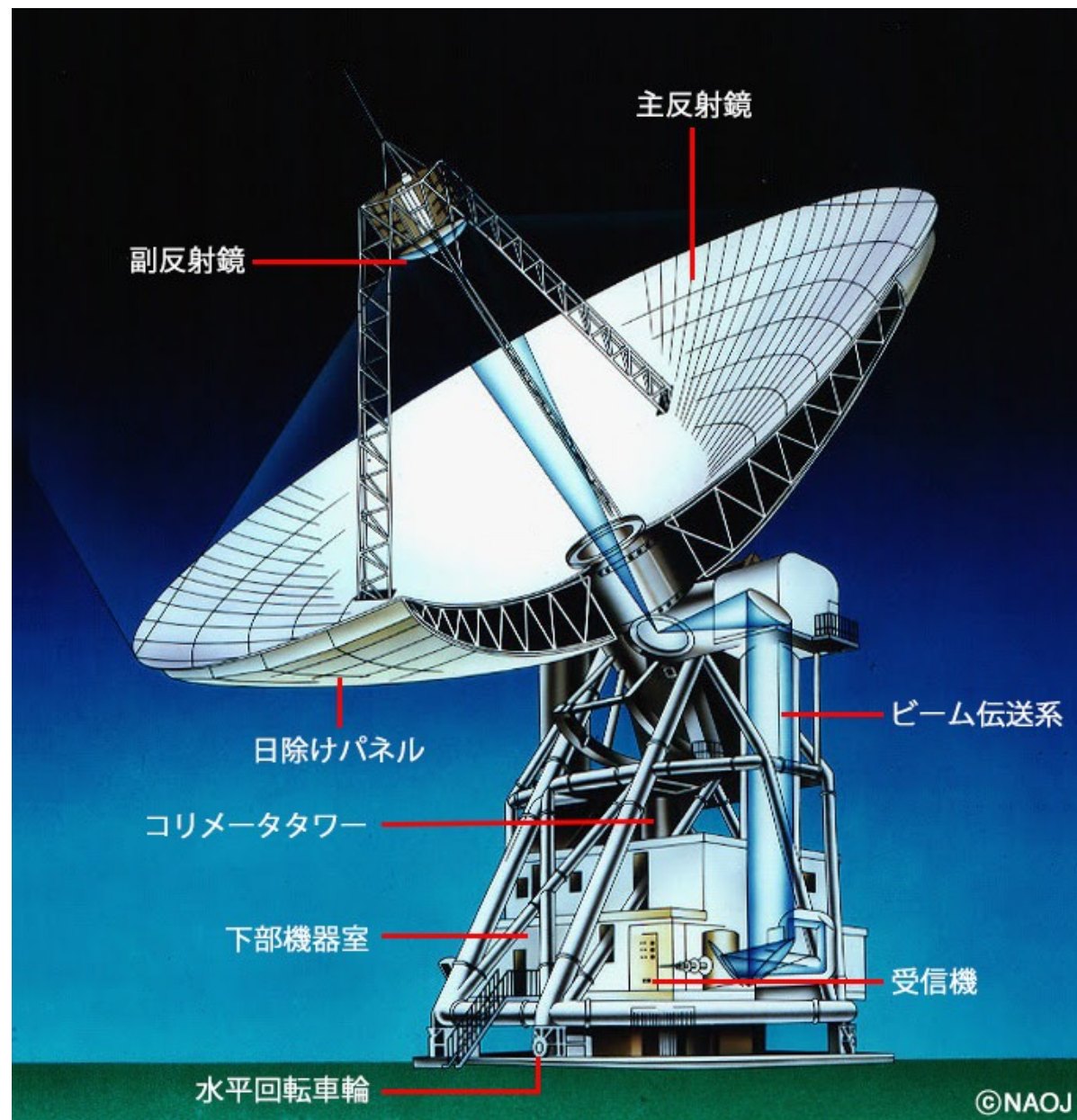
2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



地球から5500万光年

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

電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い, 分解能高い



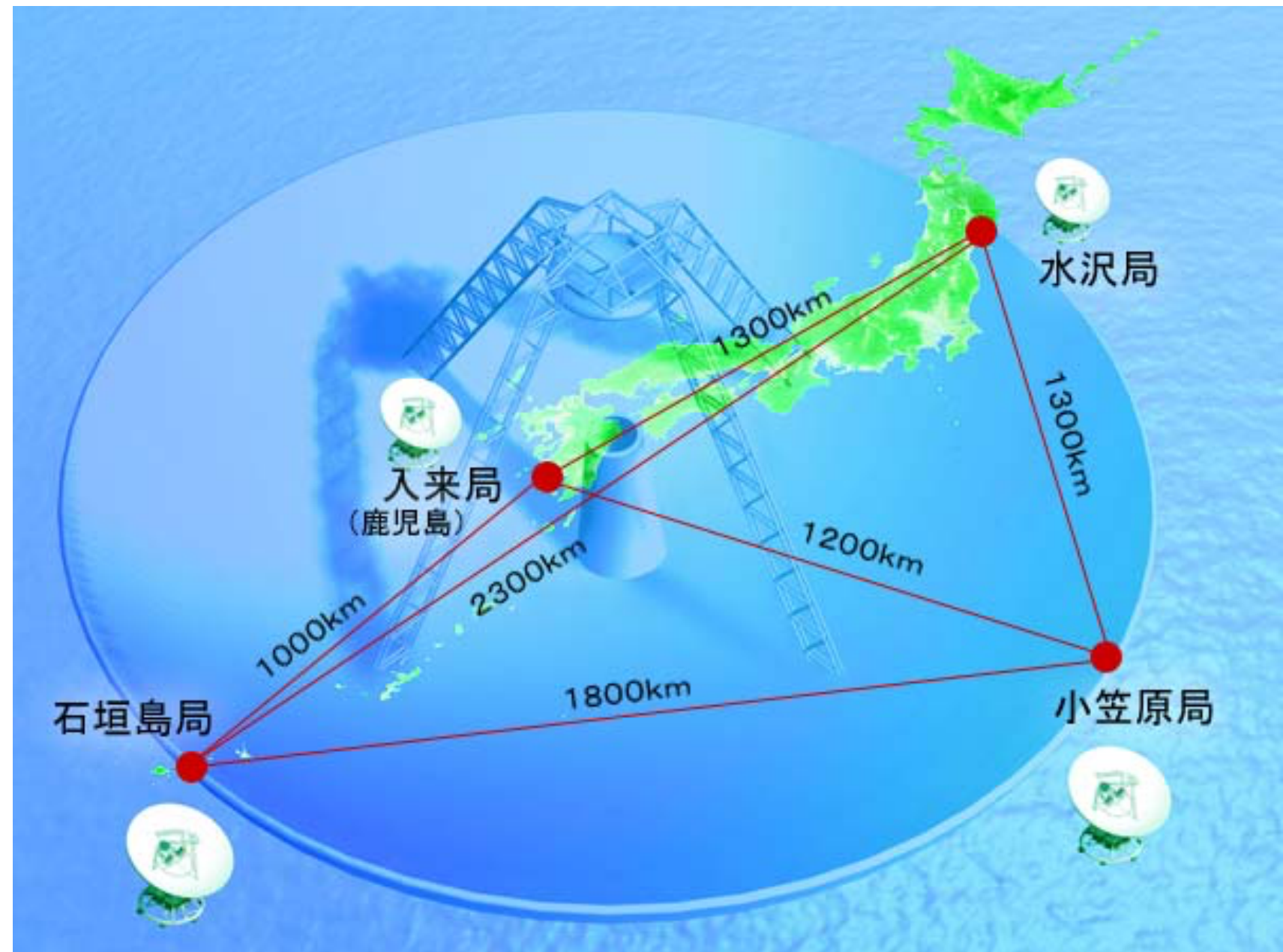
$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

野辺山45m望遠鏡

電波干渉計

VLBI = Very Long Baseline Interferometer

VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



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

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



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



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

The Event Horizon Telescope Collaboration

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

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

Abstract

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

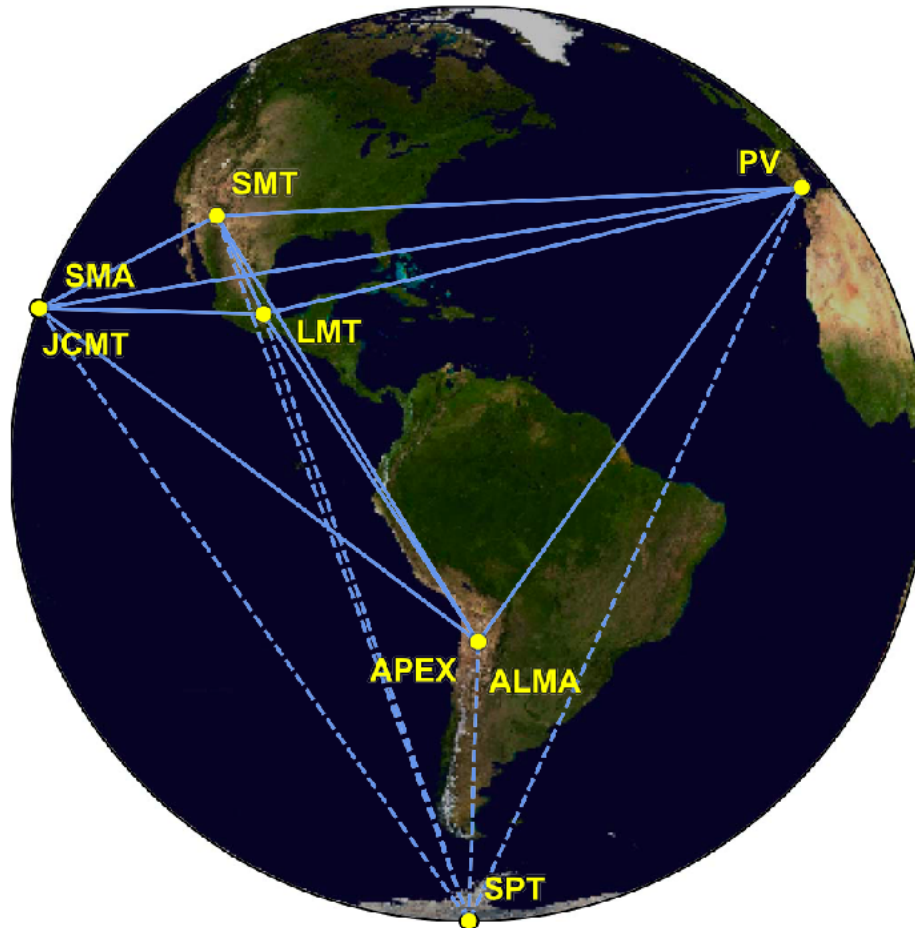


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

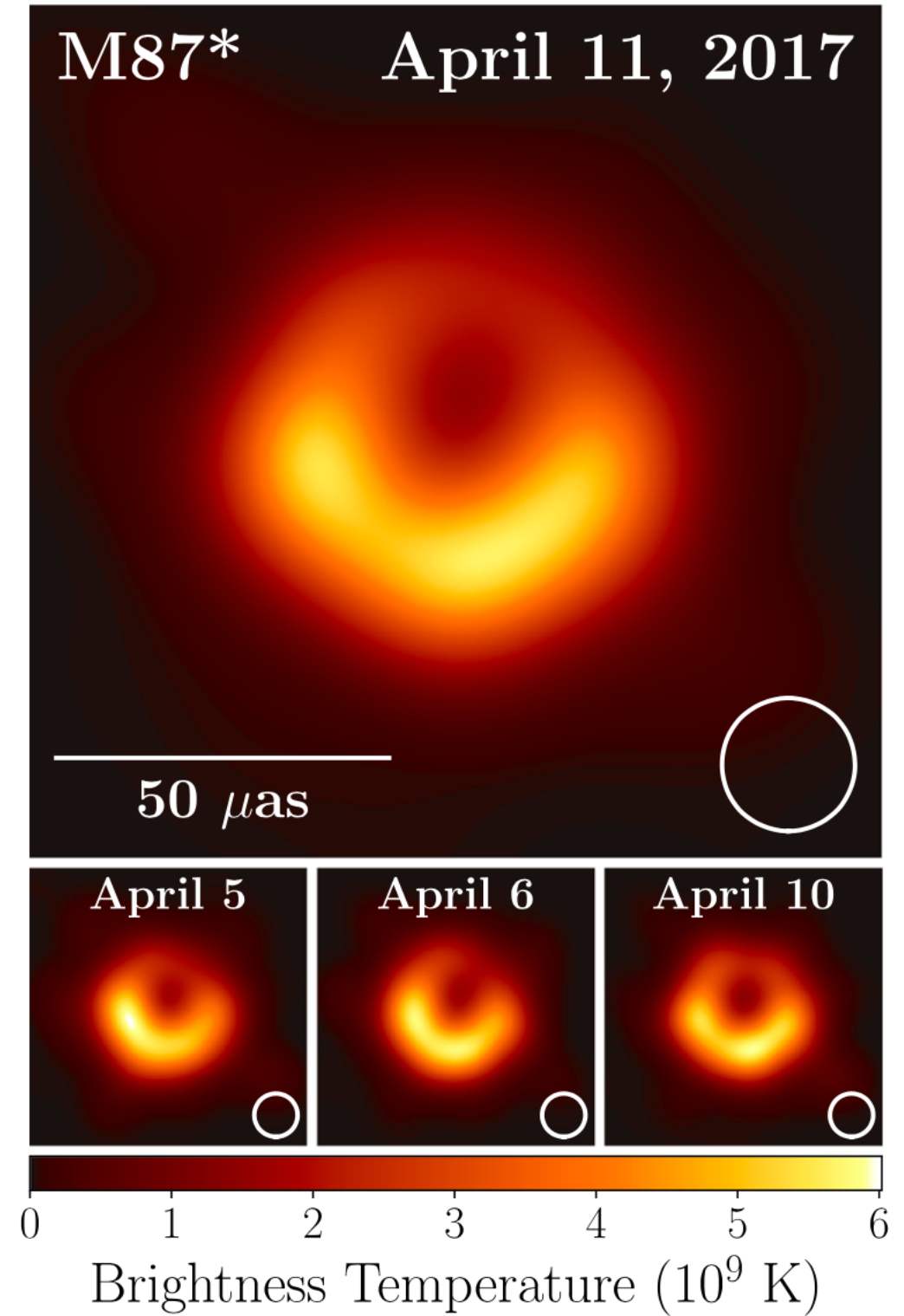


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the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

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

EHT image

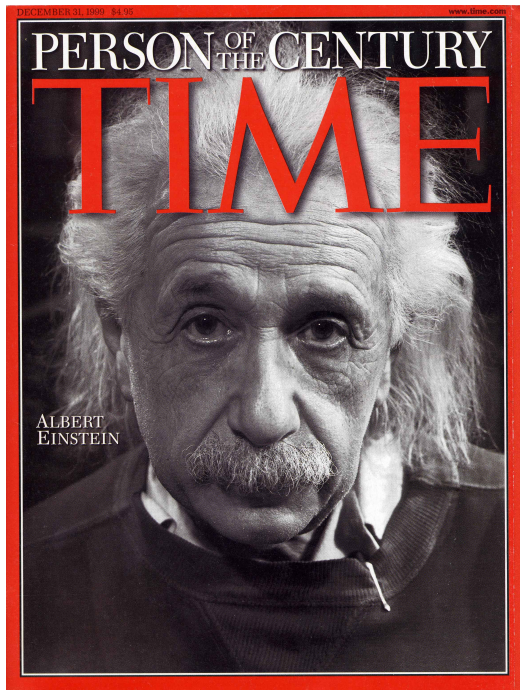


<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-ehl/videos.html>

0'58"

アインシュタインはどこまで正しい？

検証が進む相対性理論



Time
1999/12/31

1. ニュートンの力学 (1687年)
2. 2つの相対性理論 (1905年, 1915年)
3. ブラックホールの観測
4. 重力波の検出
5. 時計を使った相対性理論の検証

真貝寿明 (しんかい ひさあき)

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

2021/7/18 第11回高校生天文活動発表会



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

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

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

JORGE CHAM © 2016

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

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

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

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

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

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

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

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

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

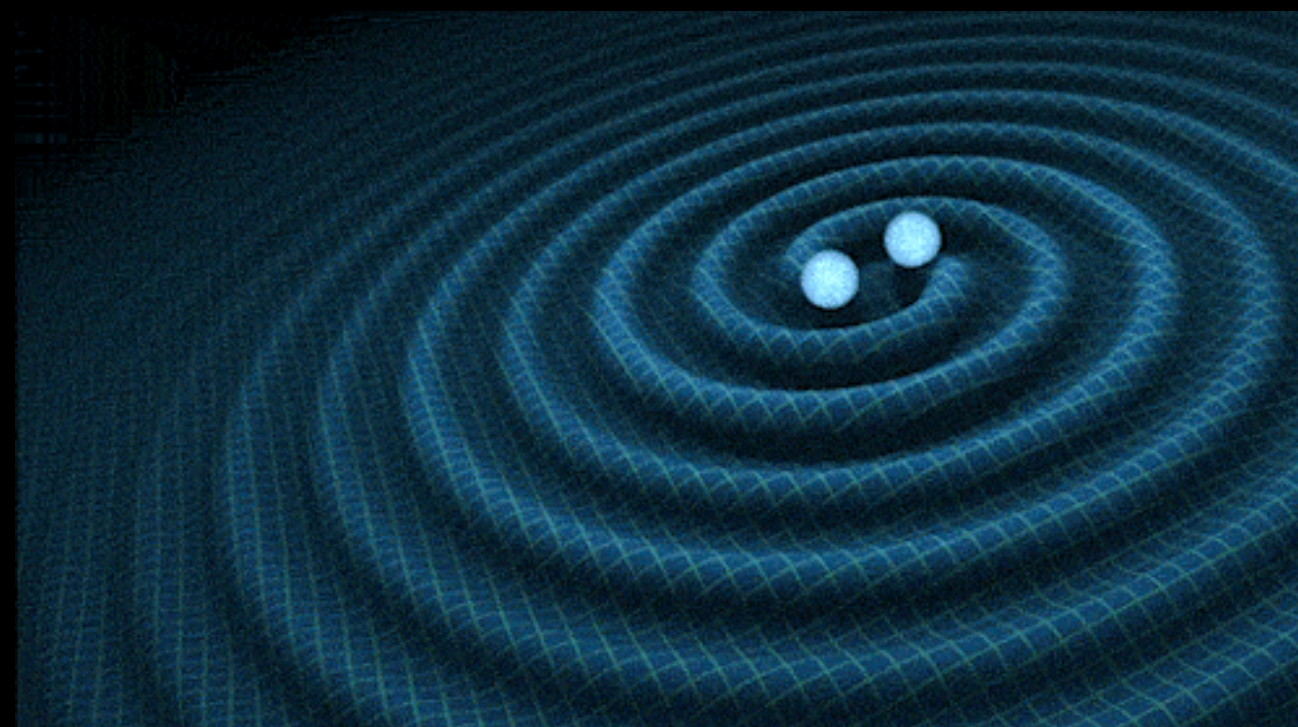
...EXAMINING THE EXTREME EDGES OF OUR KNOWLEDGE OF PHYSICS...

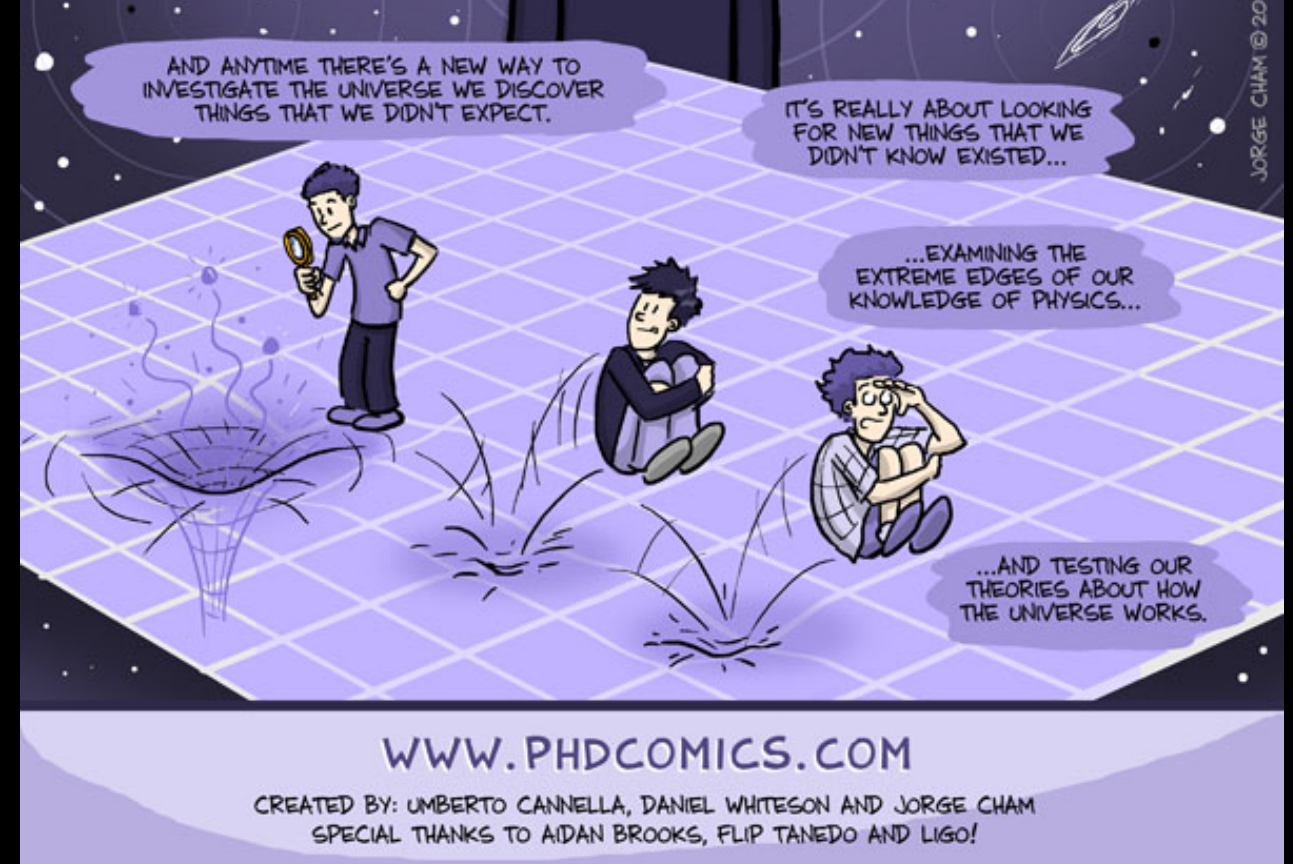
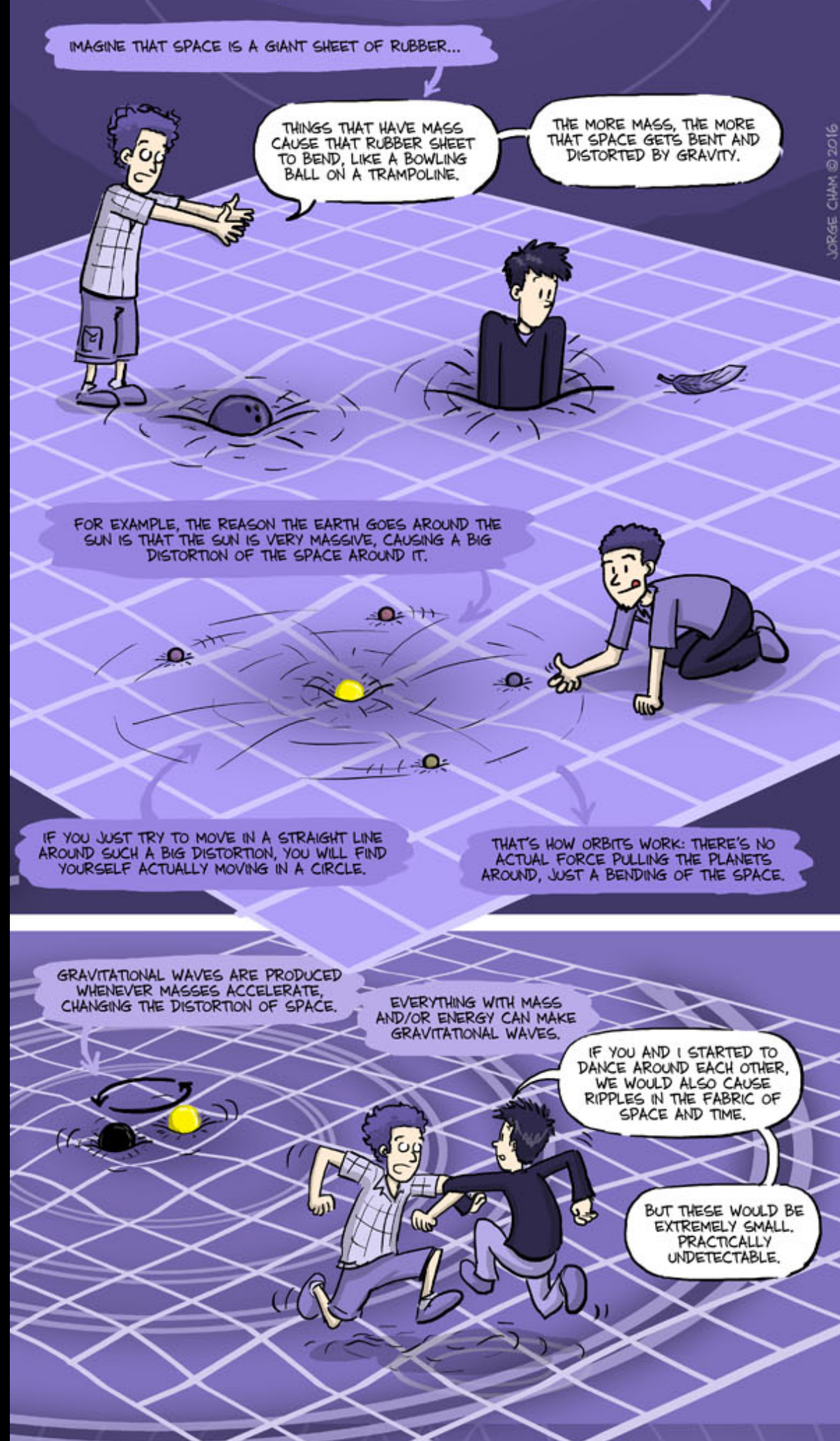
...AND TESTING OUR THEORIES ABOUT HOW THE UNIVERSE WORKS.

JORGE CHAM © 2016

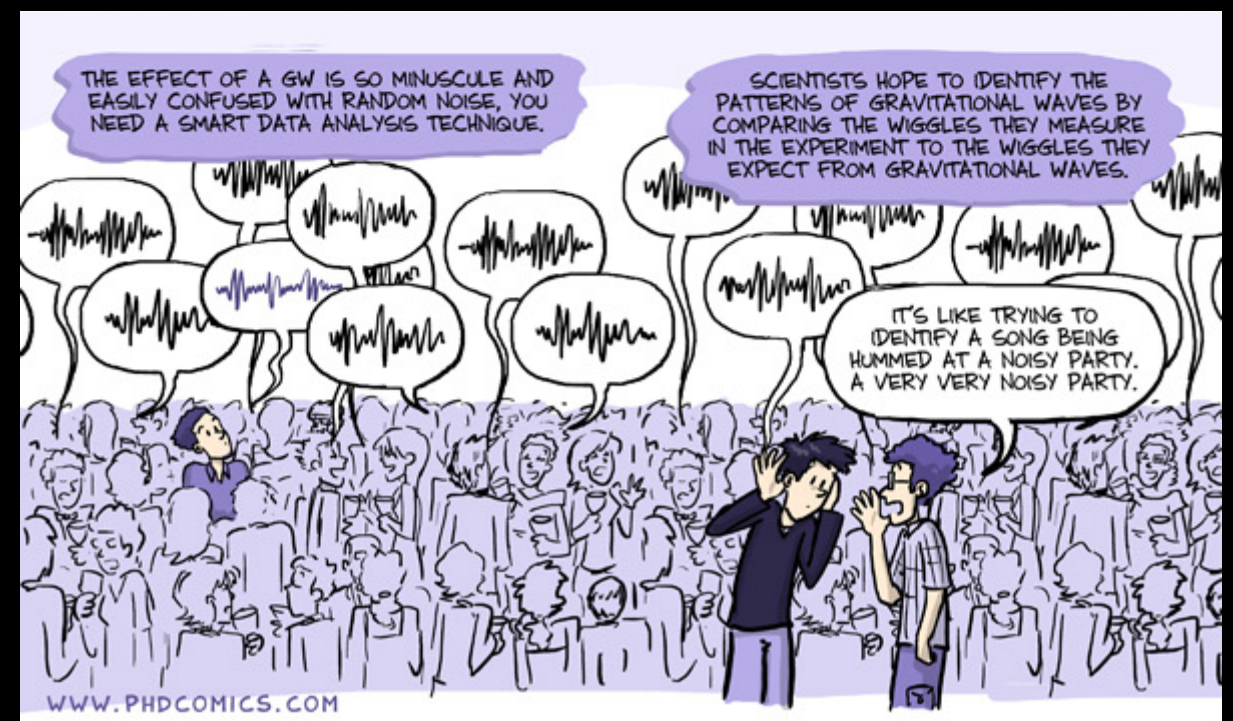
WWW.PHDCOMICS.COM

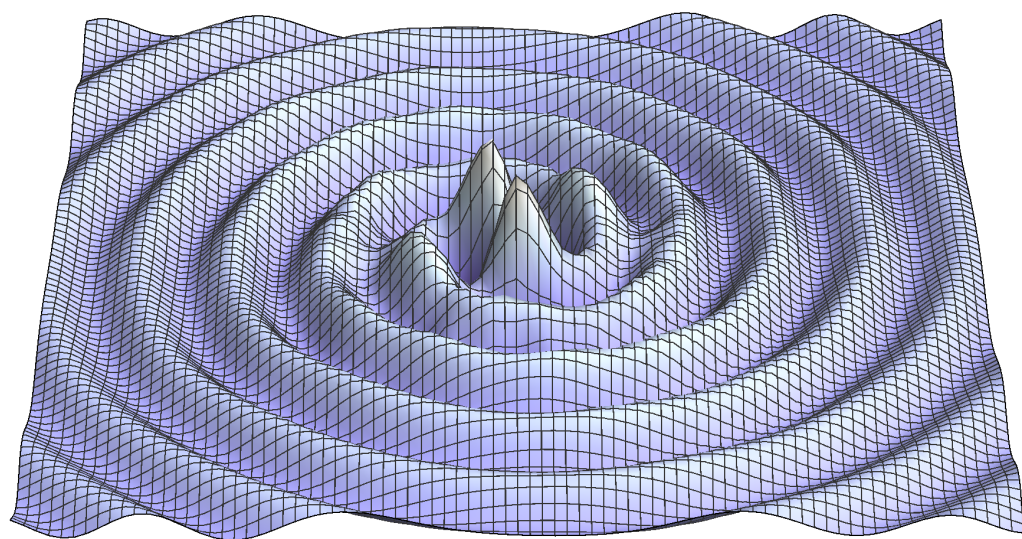
CREATED BY: UMBERTO CANNELLA, DANIEL WHITESON AND JORGE CHAM
SPECIAL THANKS TO AIDAN BROOKS, FLIP TANEDO AND LIGO!





www.phdcomics.com “gravitational waves explained”





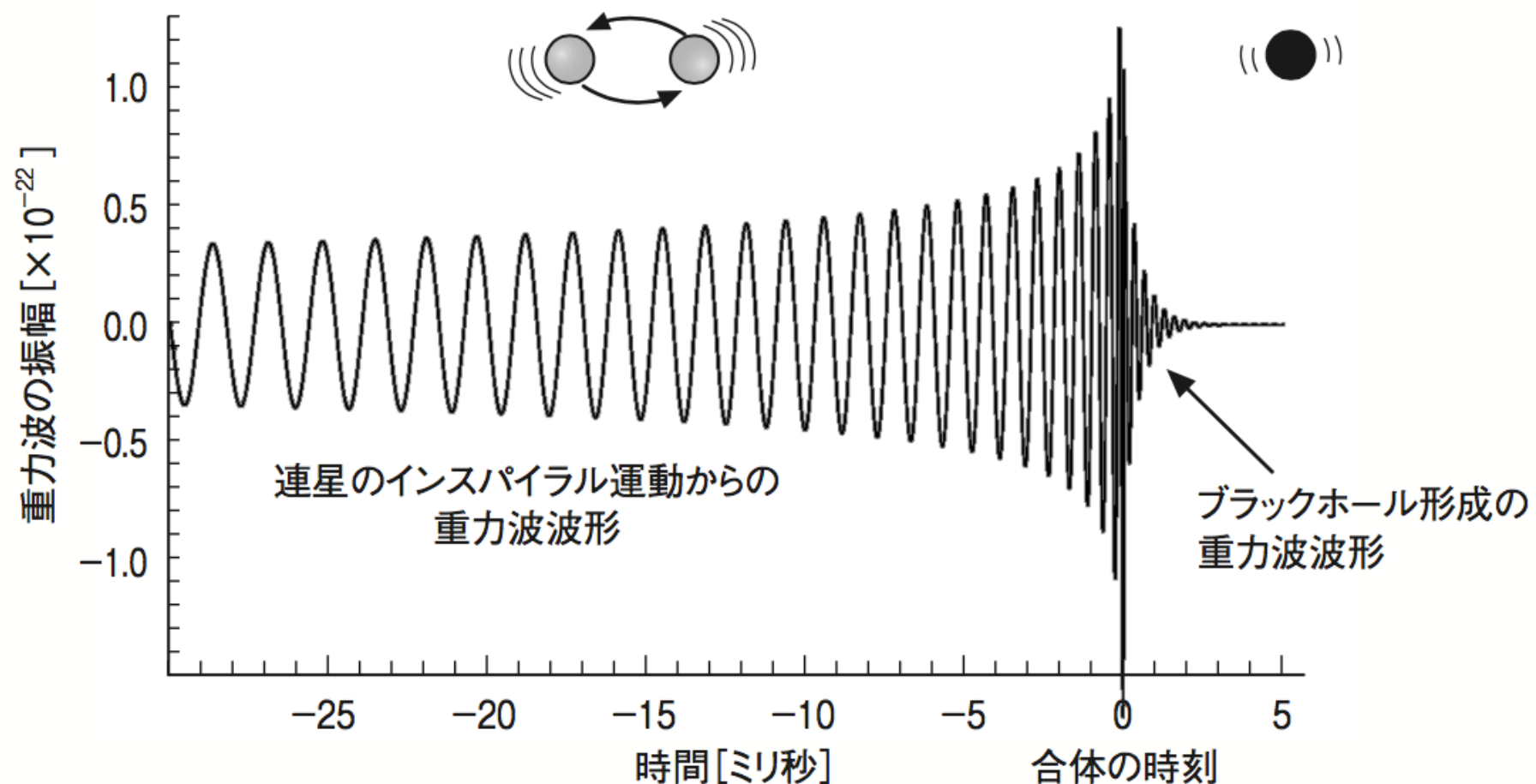
重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星
連星ブラックホール

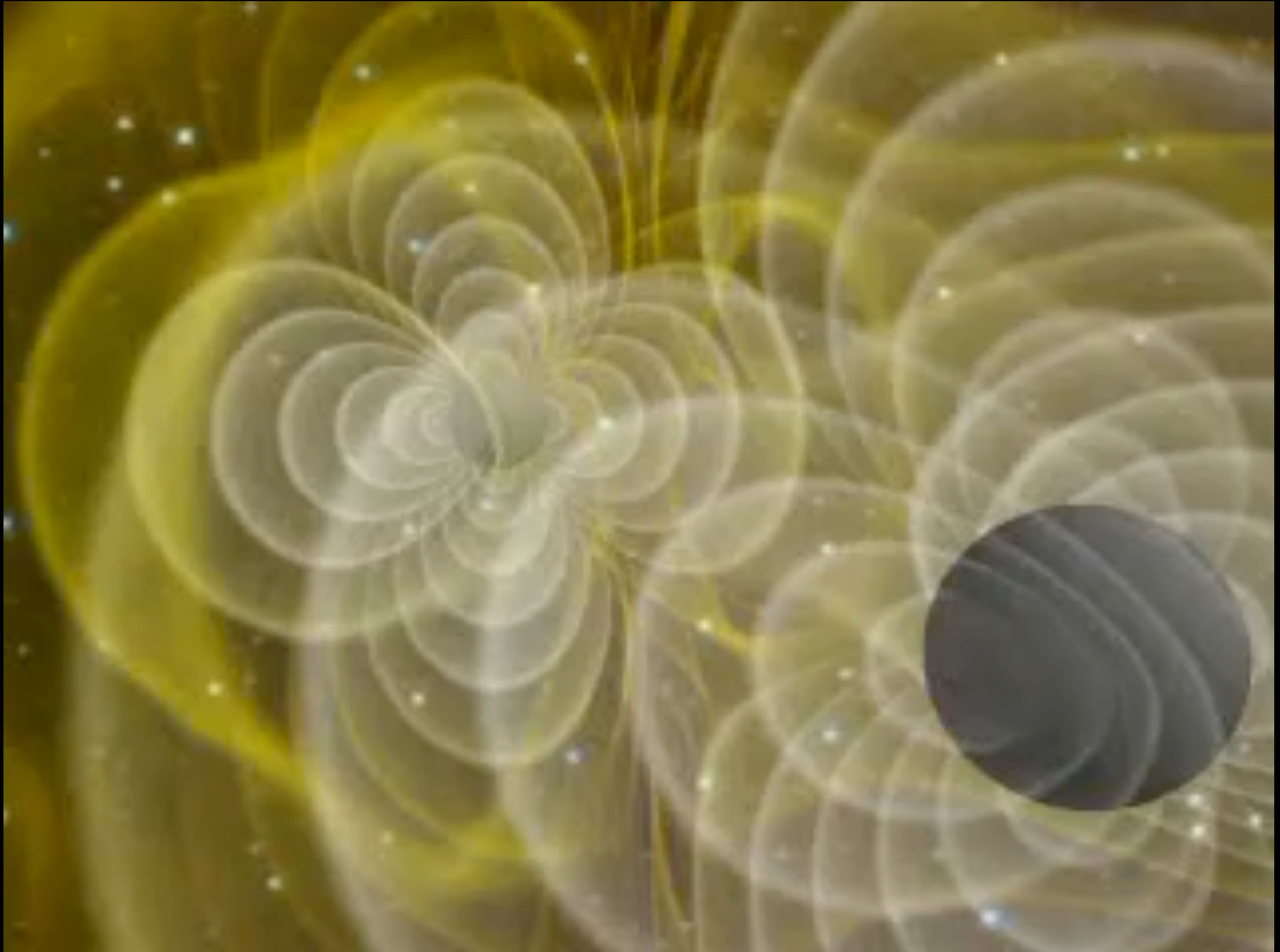
インスパイラル

合体

リングダウン



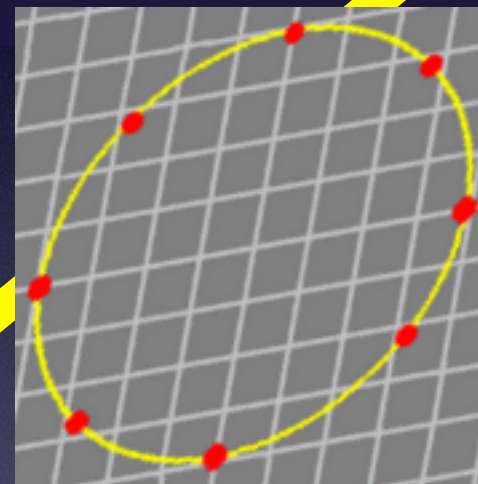
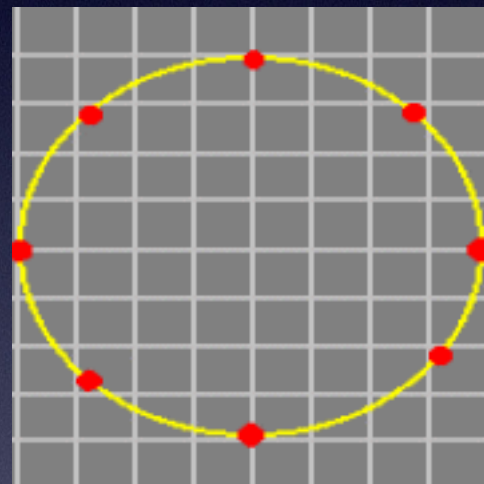
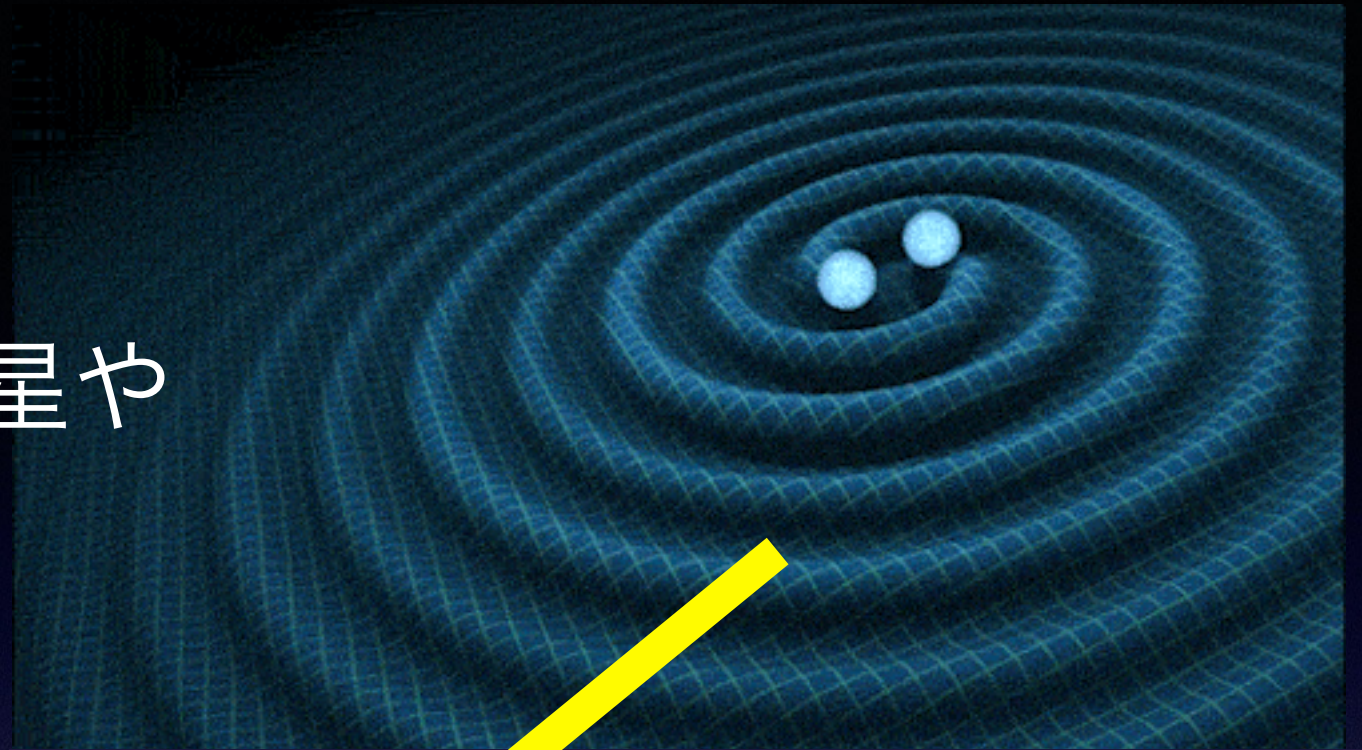
ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星

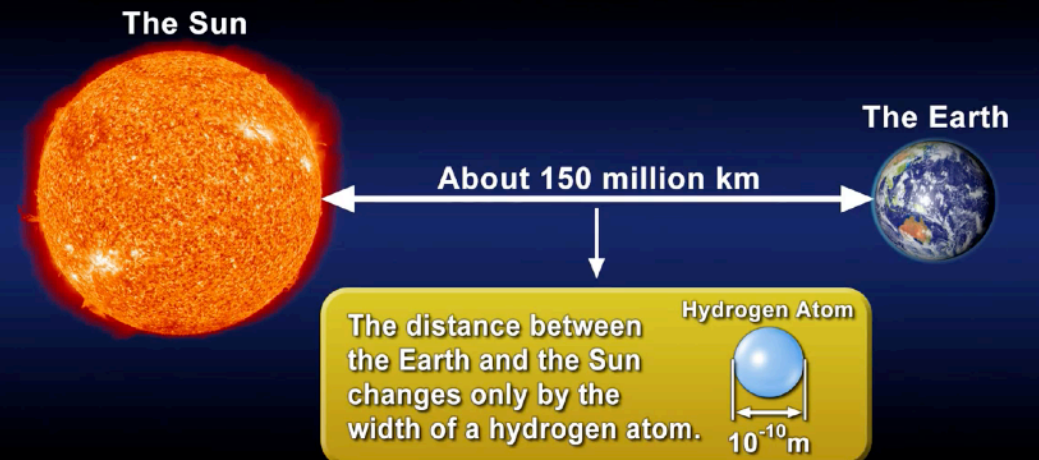


レーザー干渉計



典型的な振幅は 10^{-22}

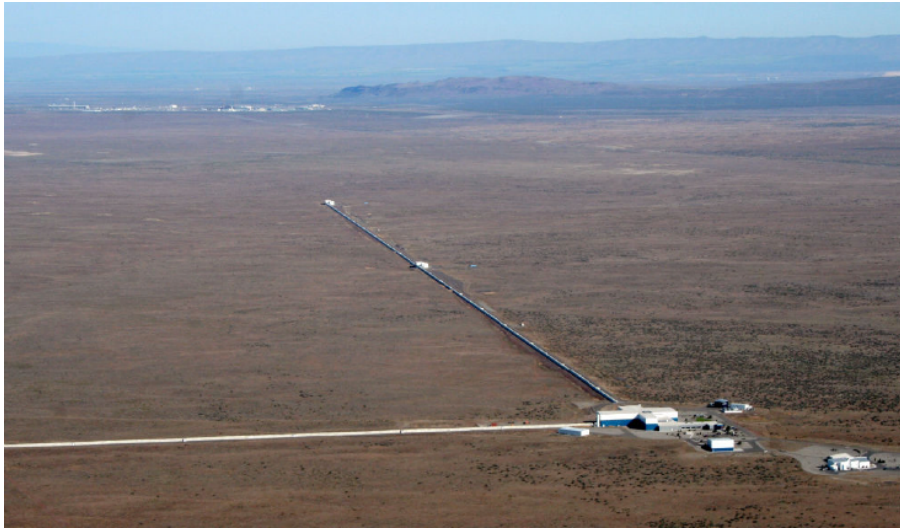
Effect of Gravitational Waves



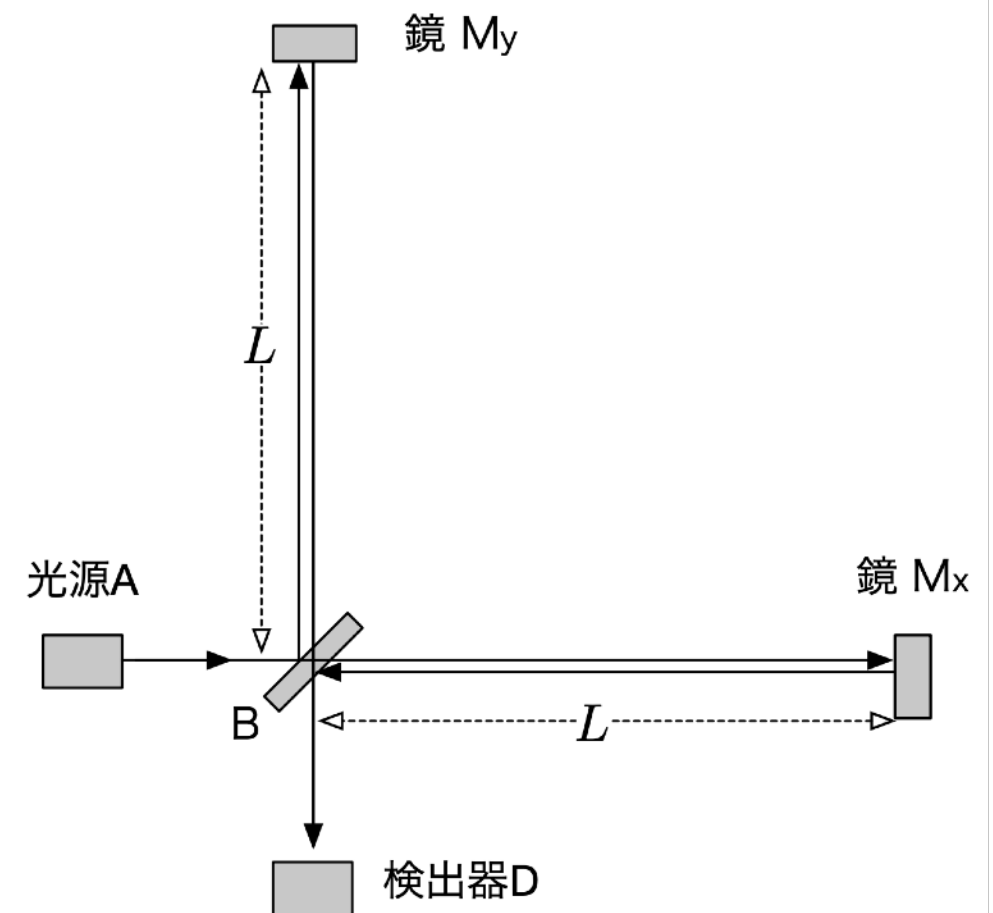
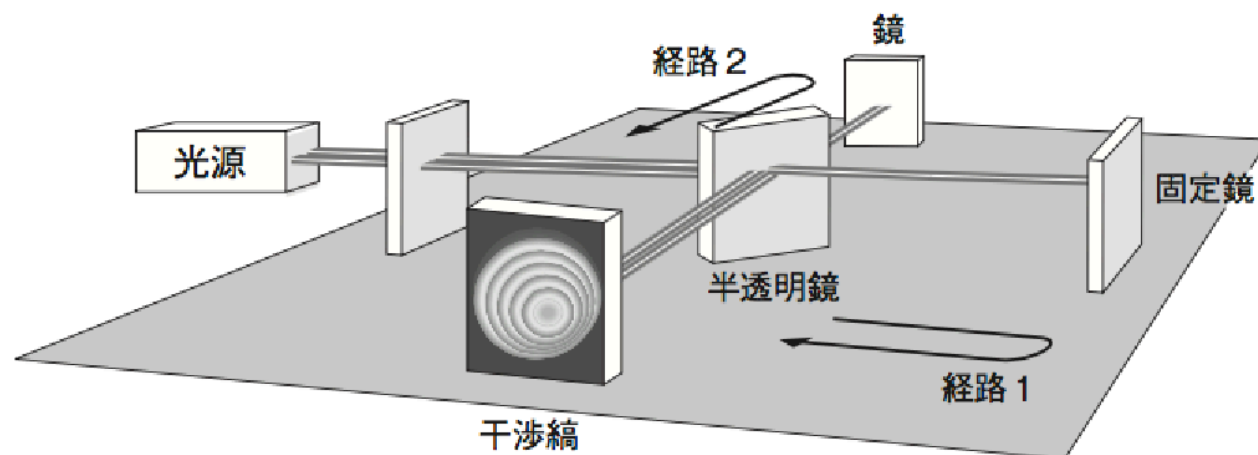
レーザー干渉計のしくみ

干渉＝波が重なって強めあったり弱めあったりする現象

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

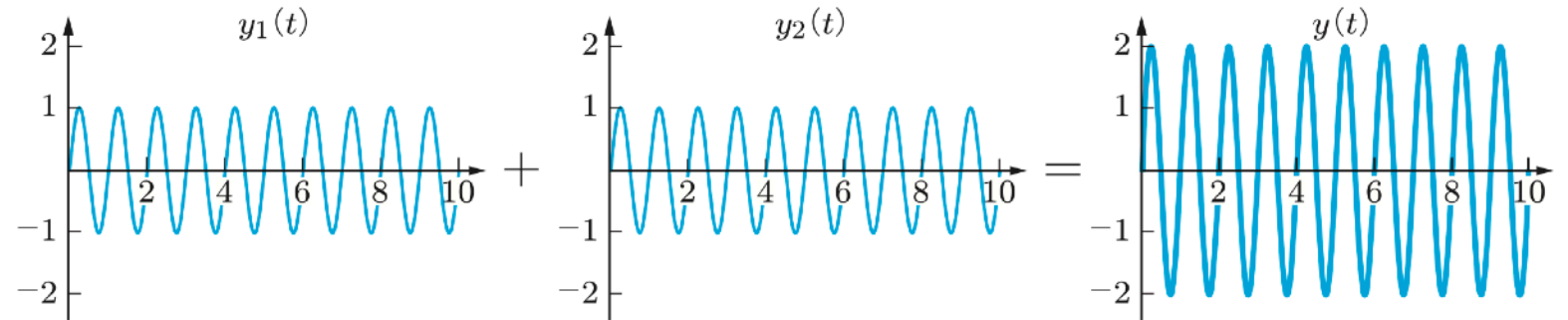


<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>

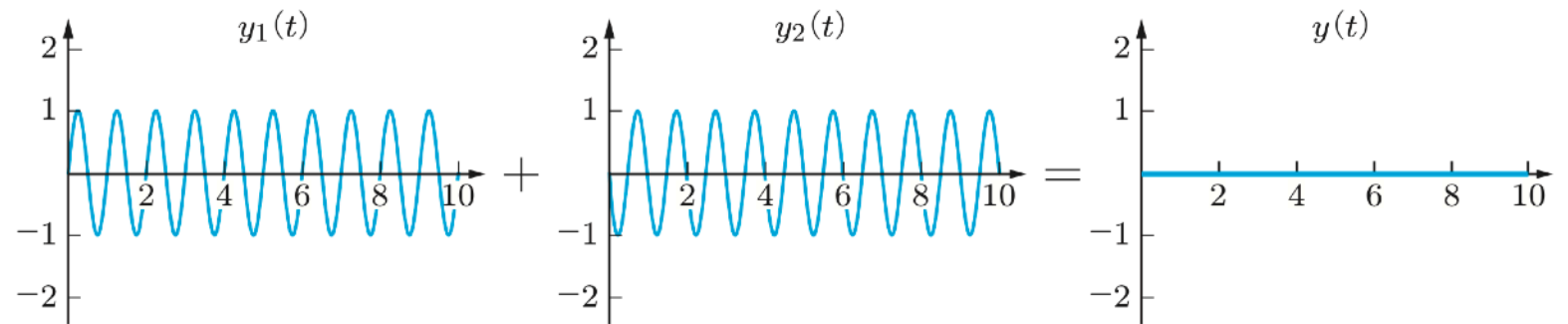


レーザー干渉計のしくみ

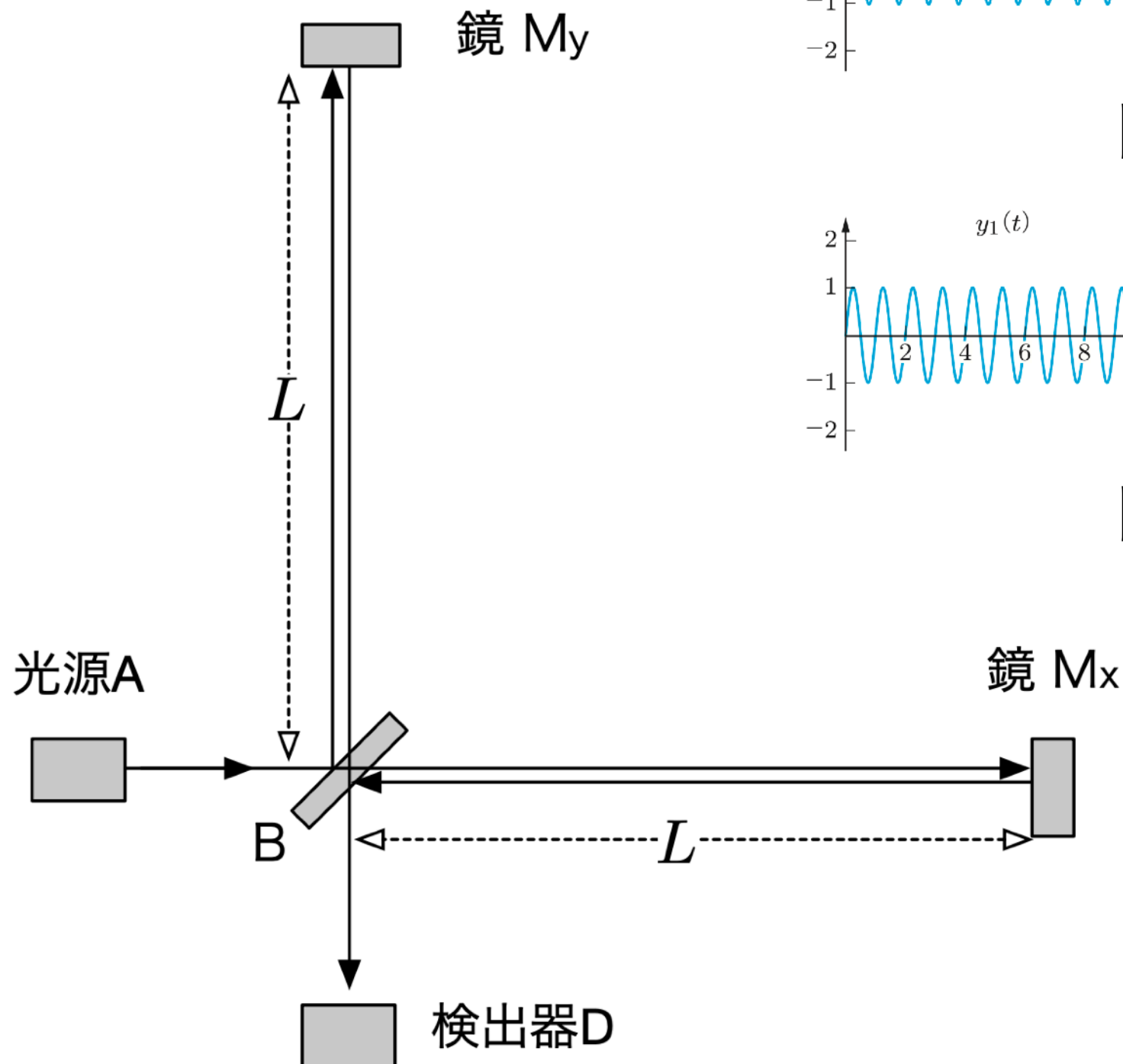
干渉＝波が重なって強めあったり弱めあったりする現象



山＋山＝強めあう

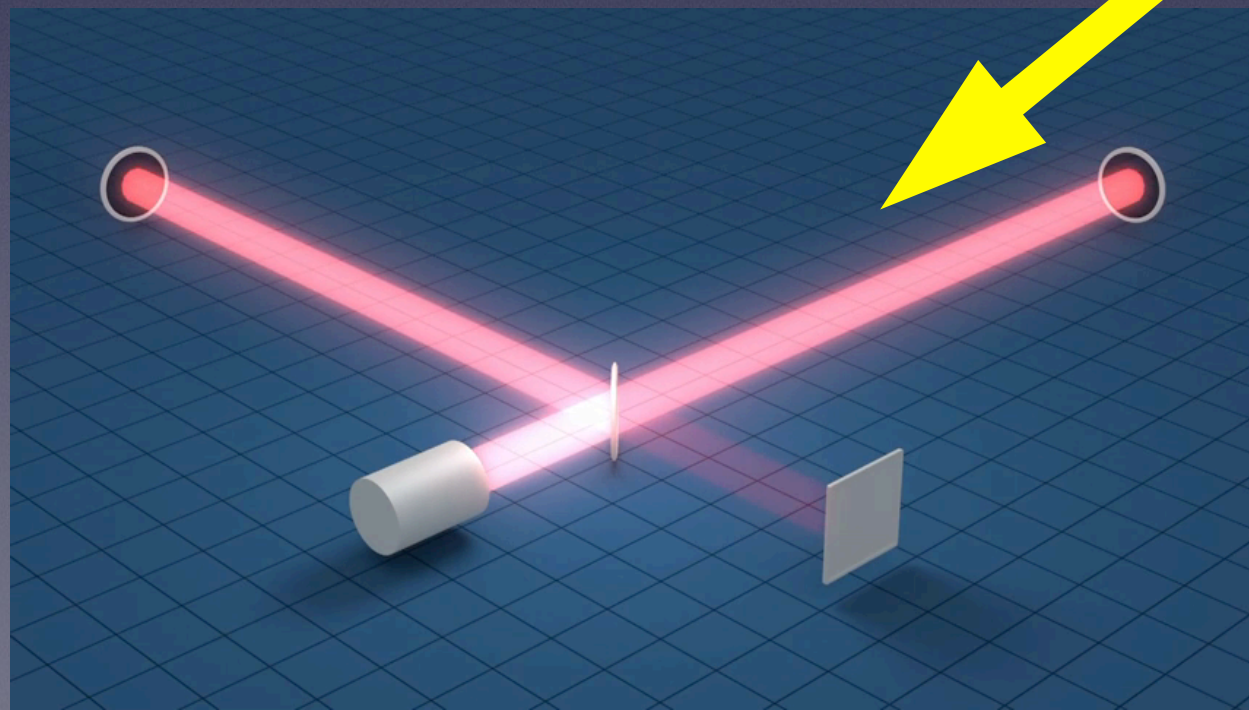
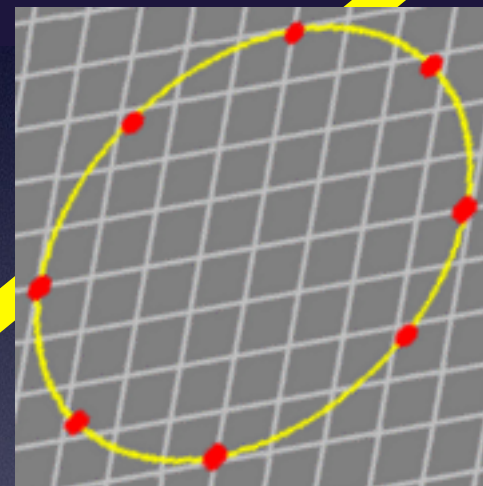
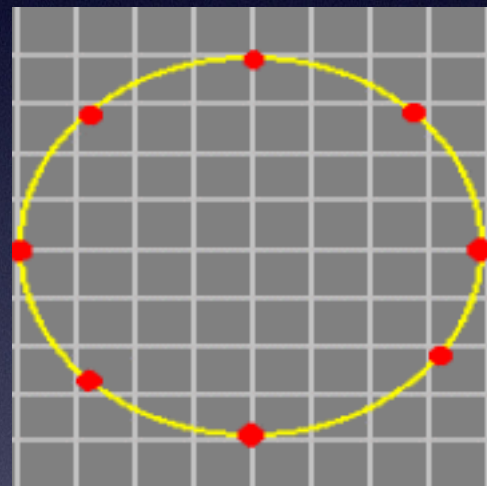
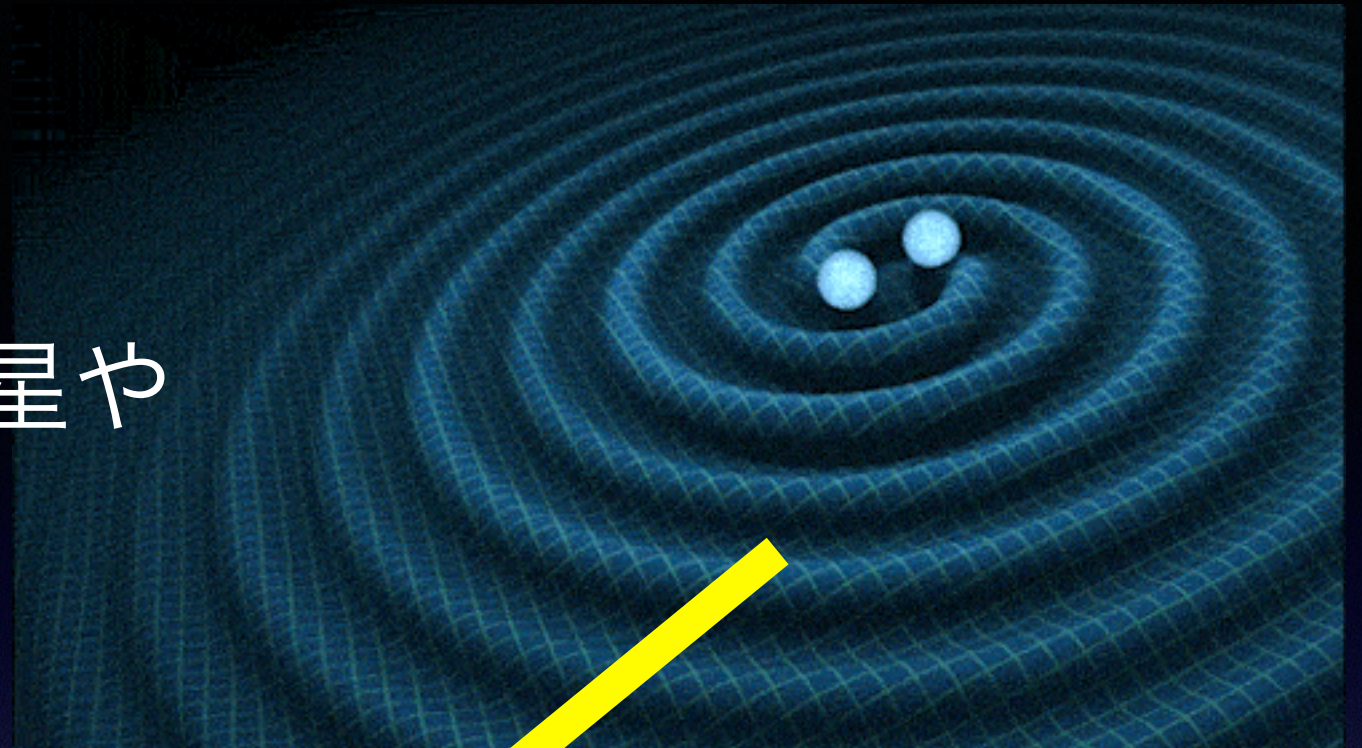


山＋谷＝弱めあう



重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



レーザー干渉計

四国新聞だけ
ちがった．．． 残念（笑）

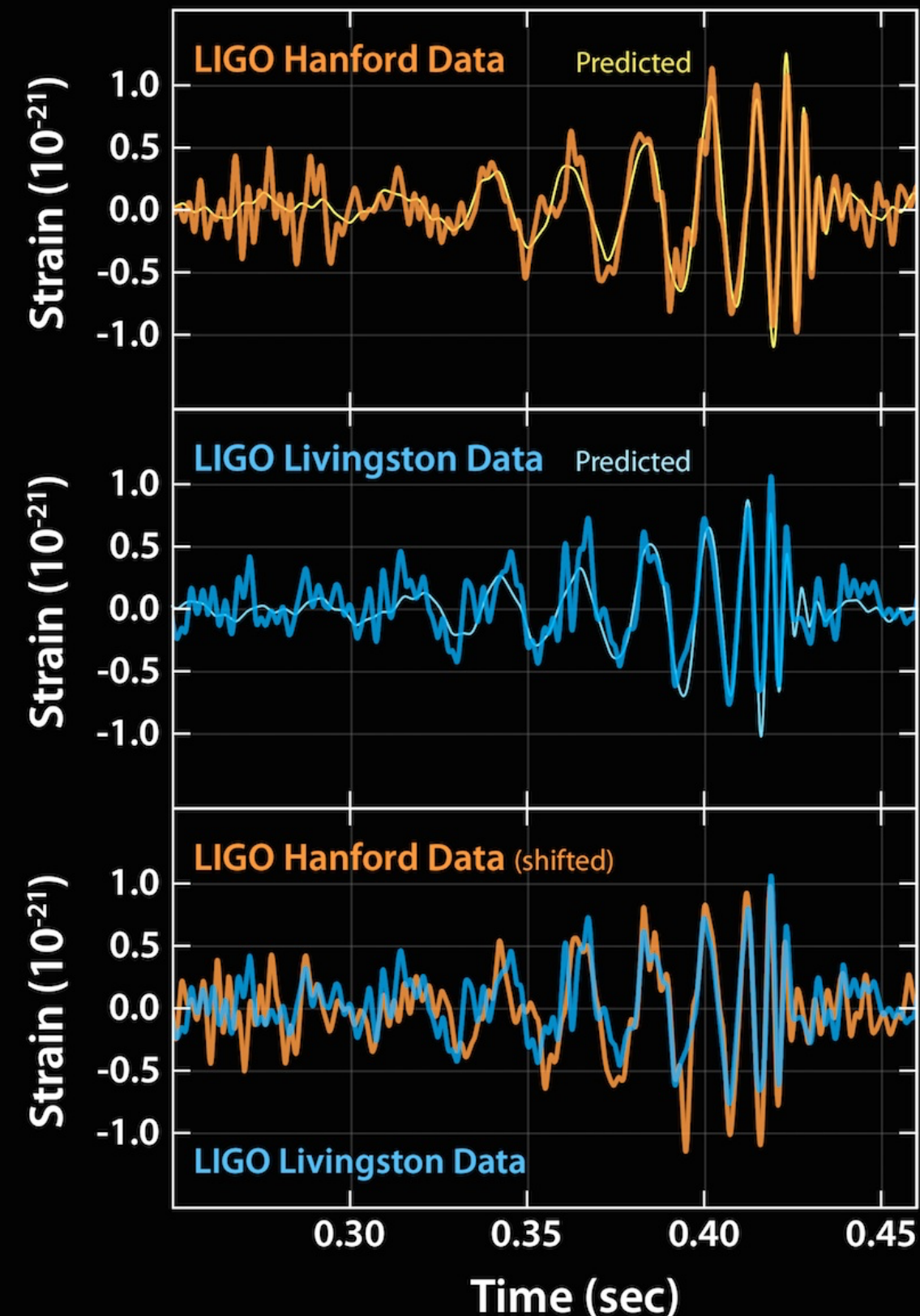


2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

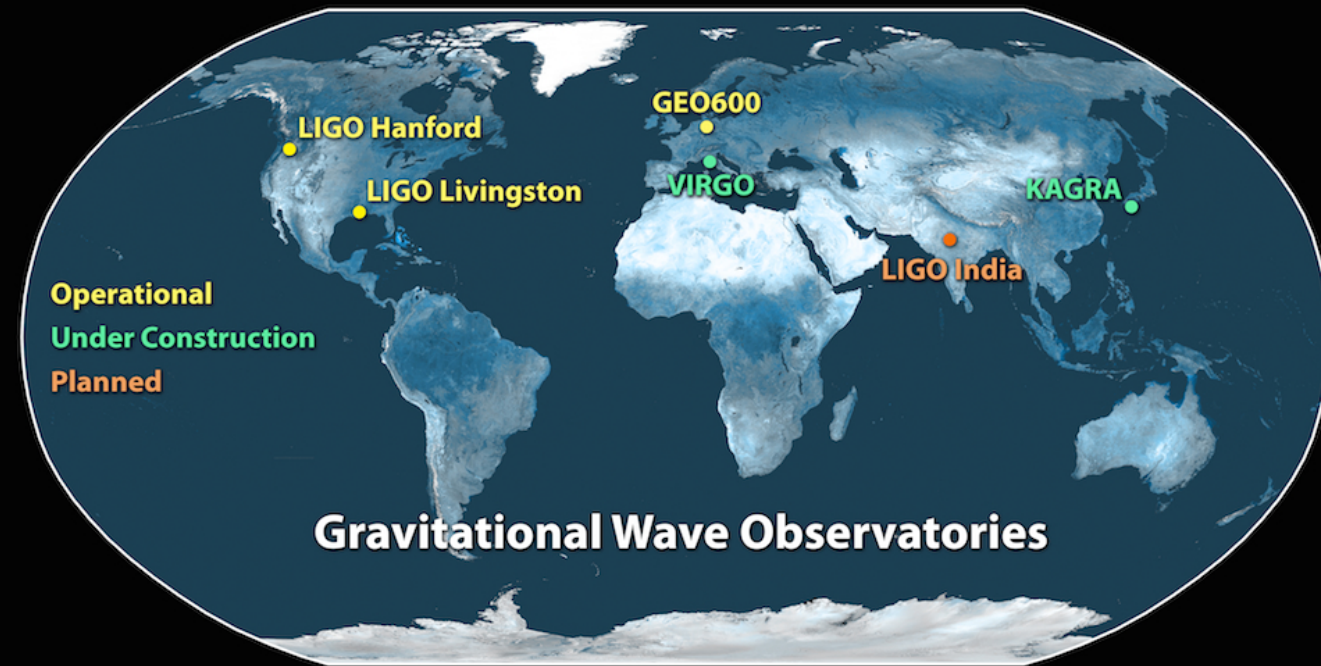
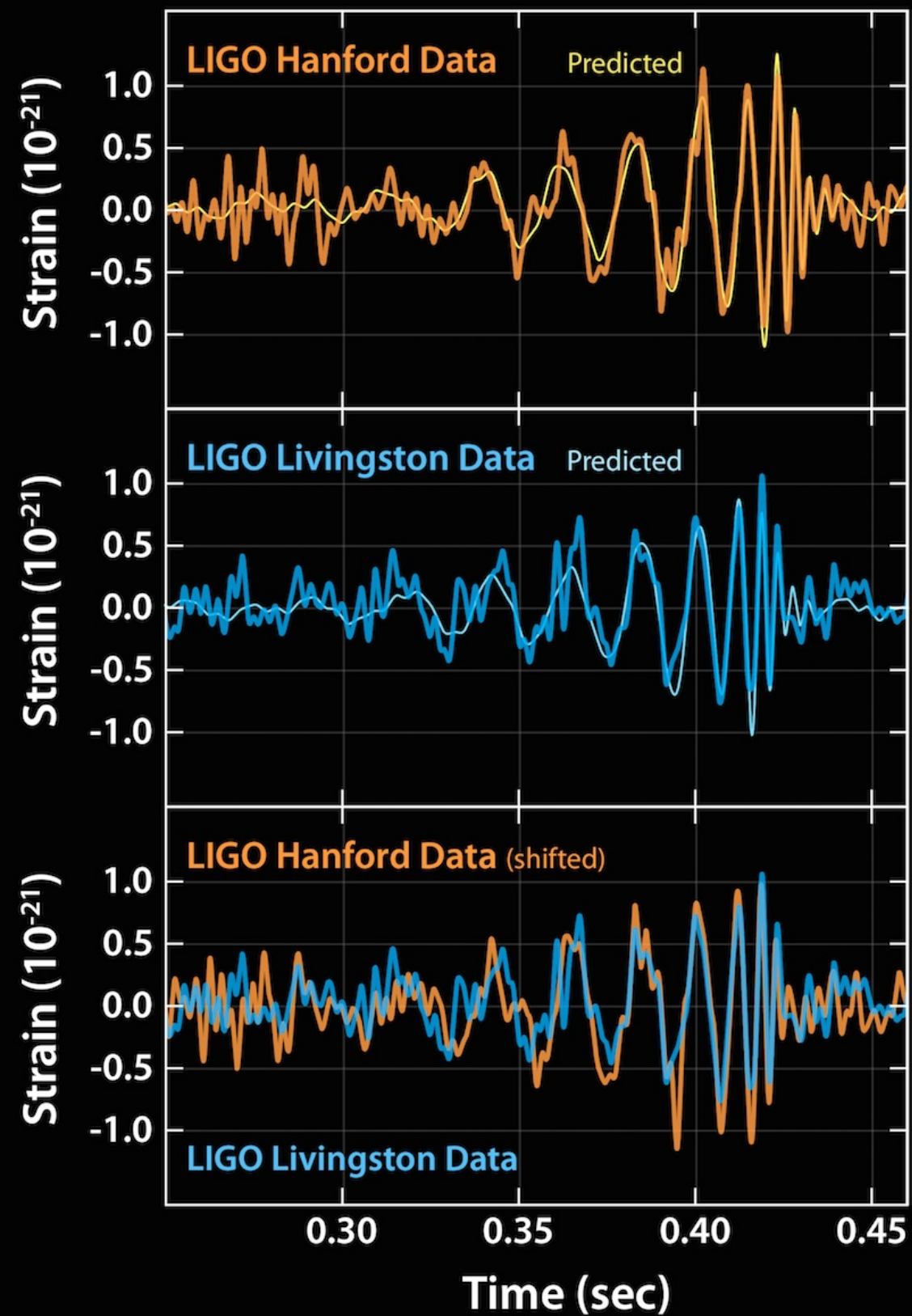
2015年9月14日



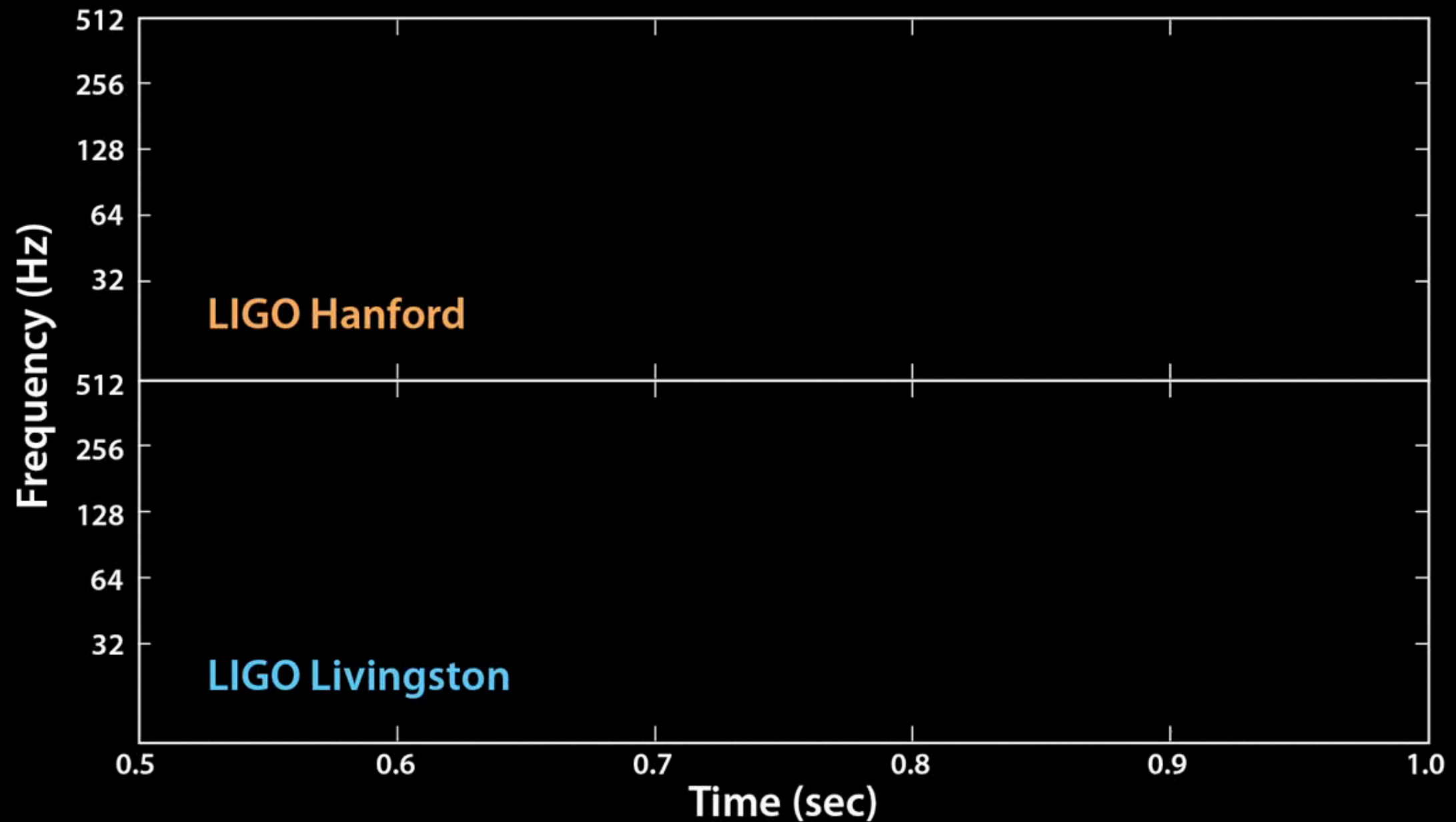
ブラックホール連星の合体
によって生じた重力波だった



2015年9月14日



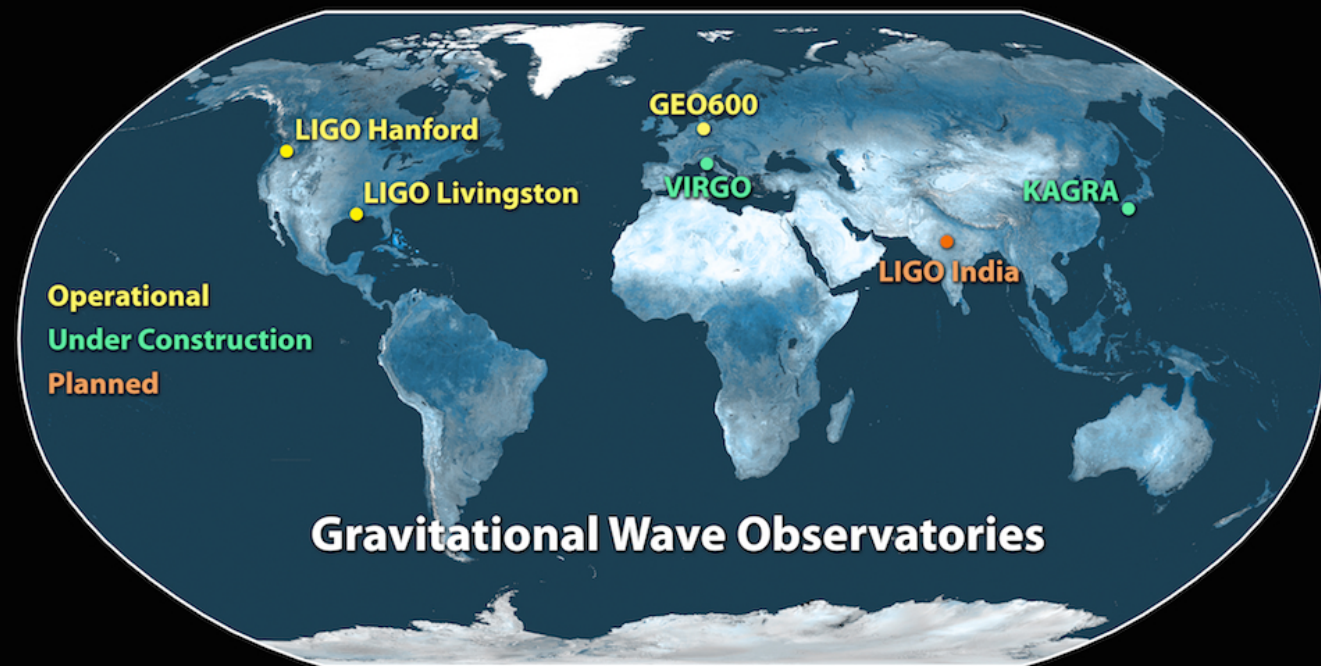
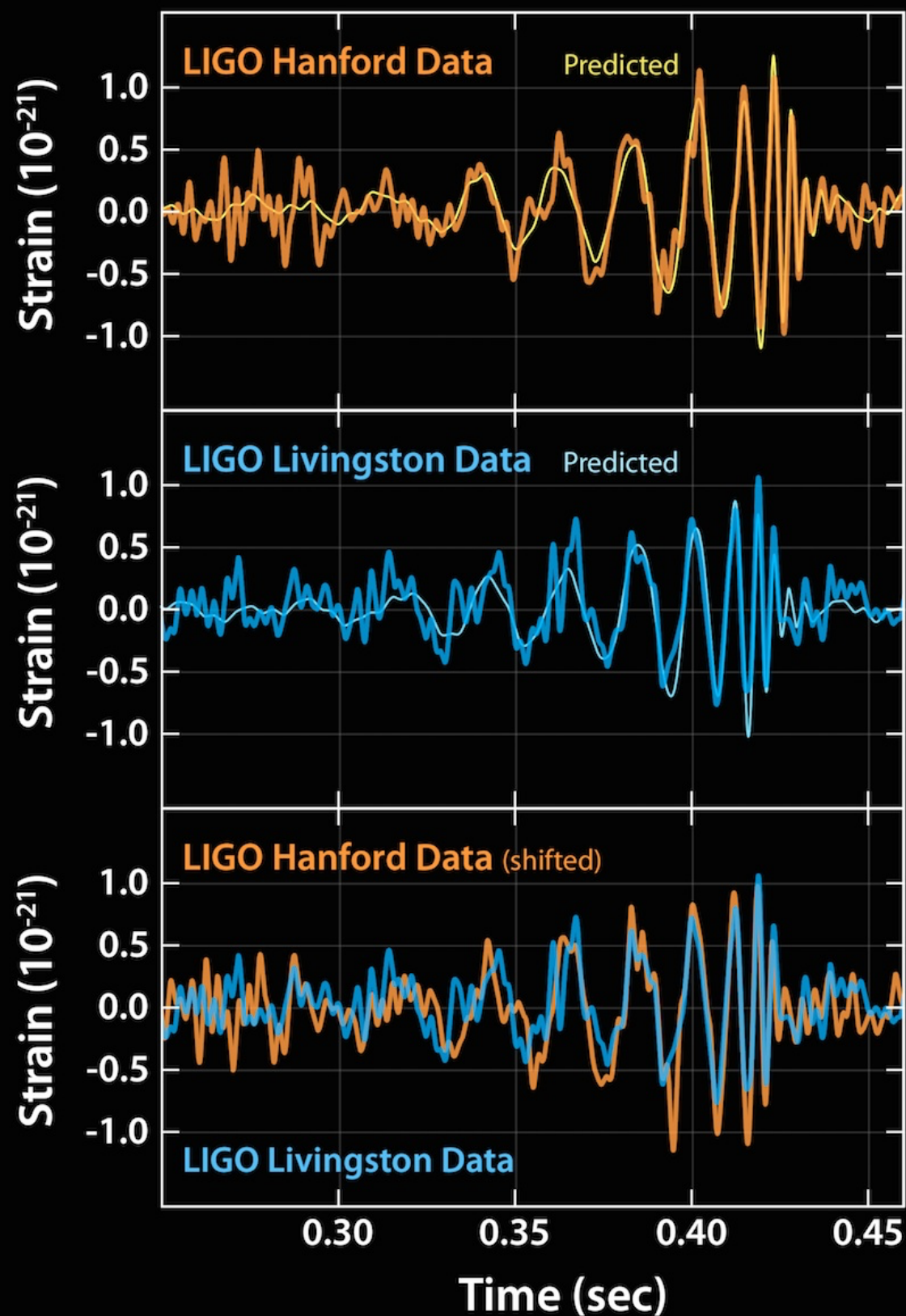
重力波波形を音にすると. . .



はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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

2015年9月14日

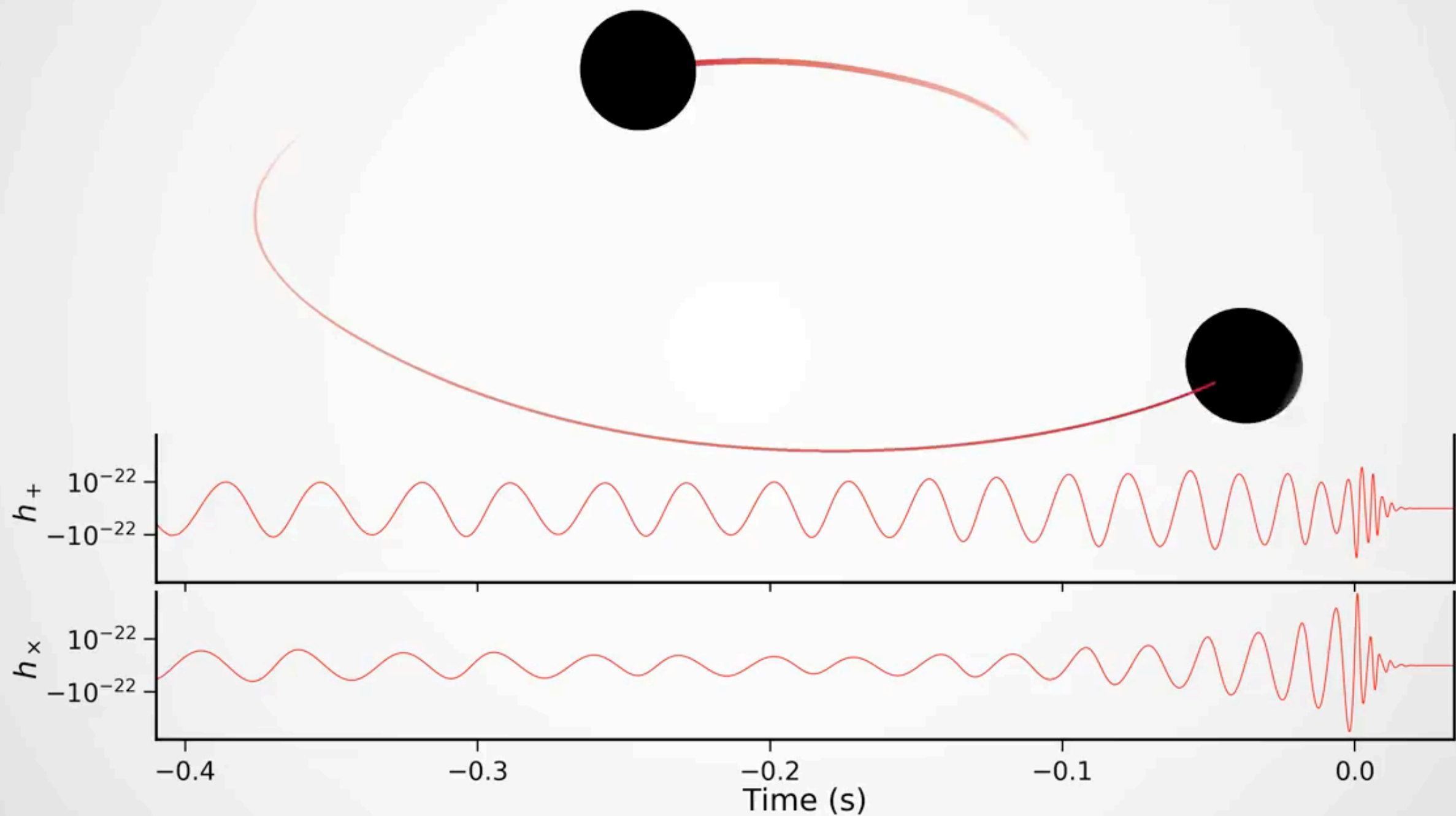


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先



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

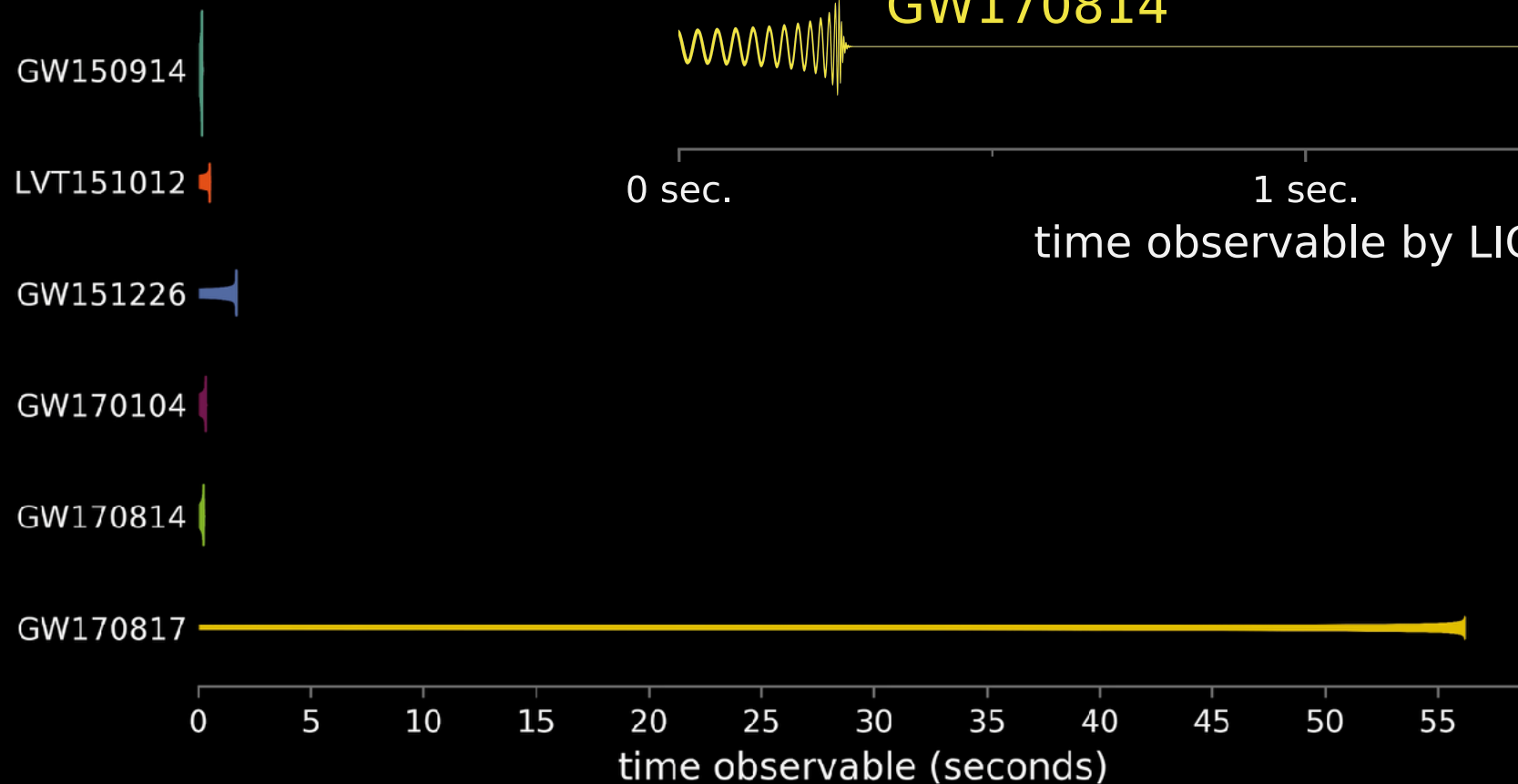
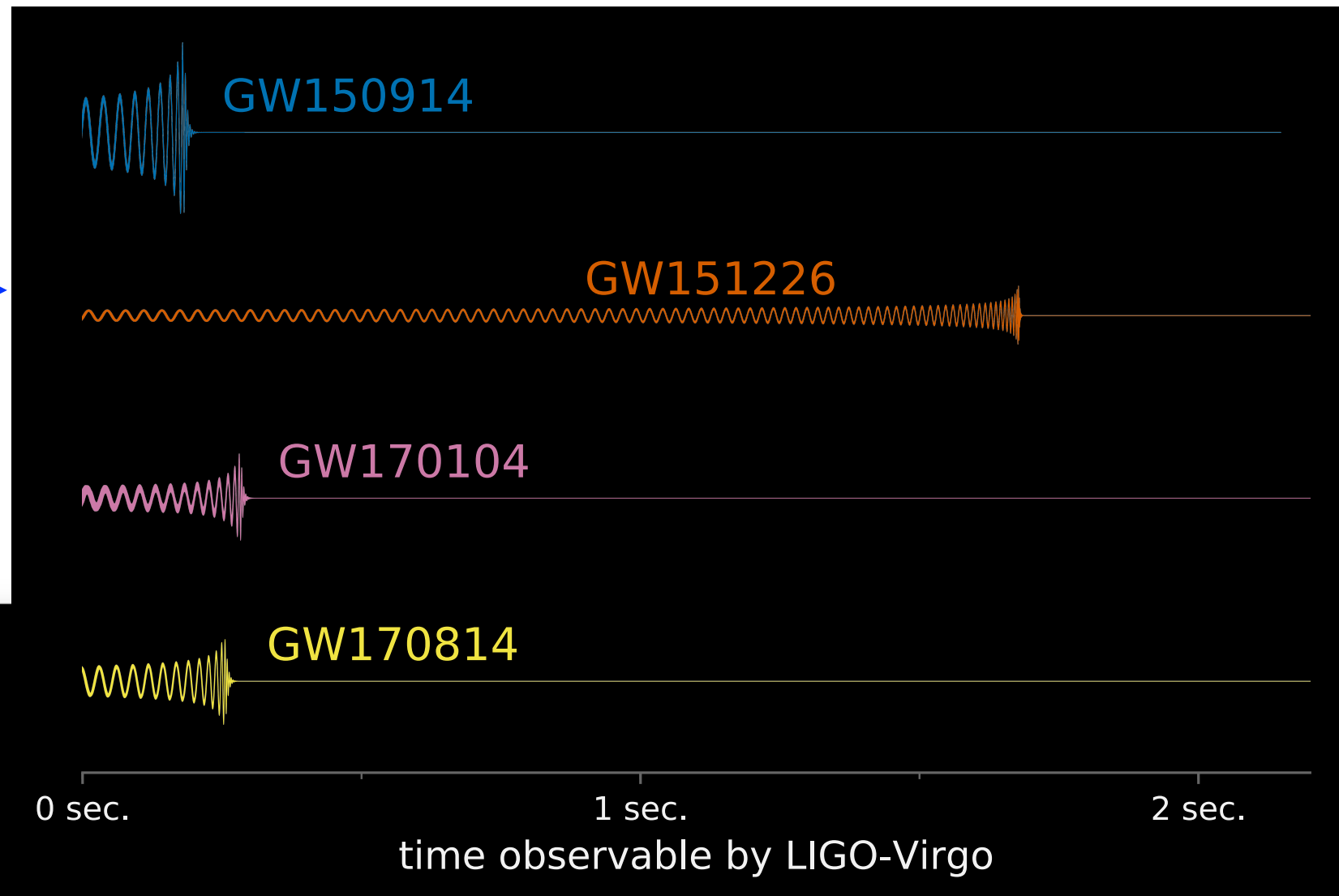
The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation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

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

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

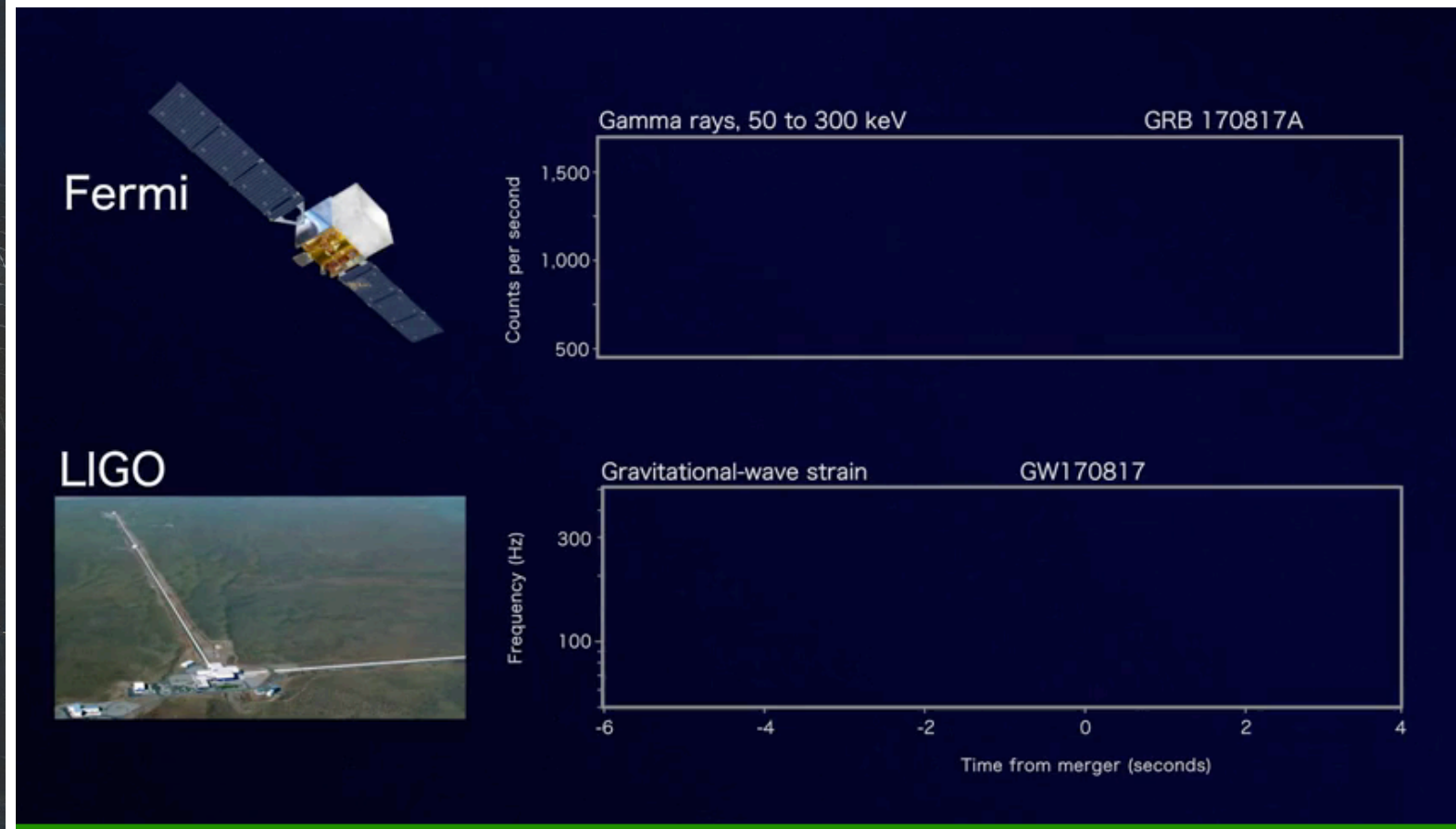
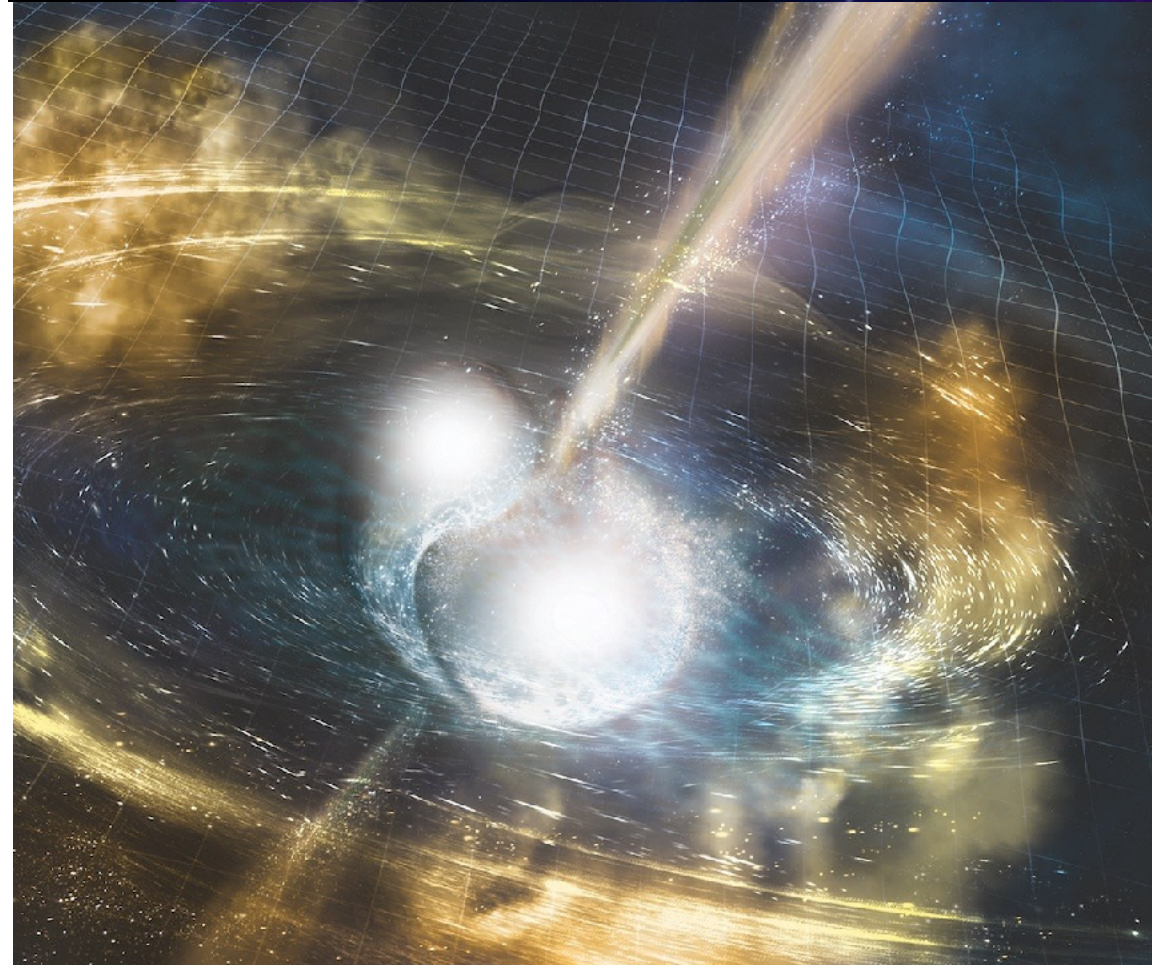
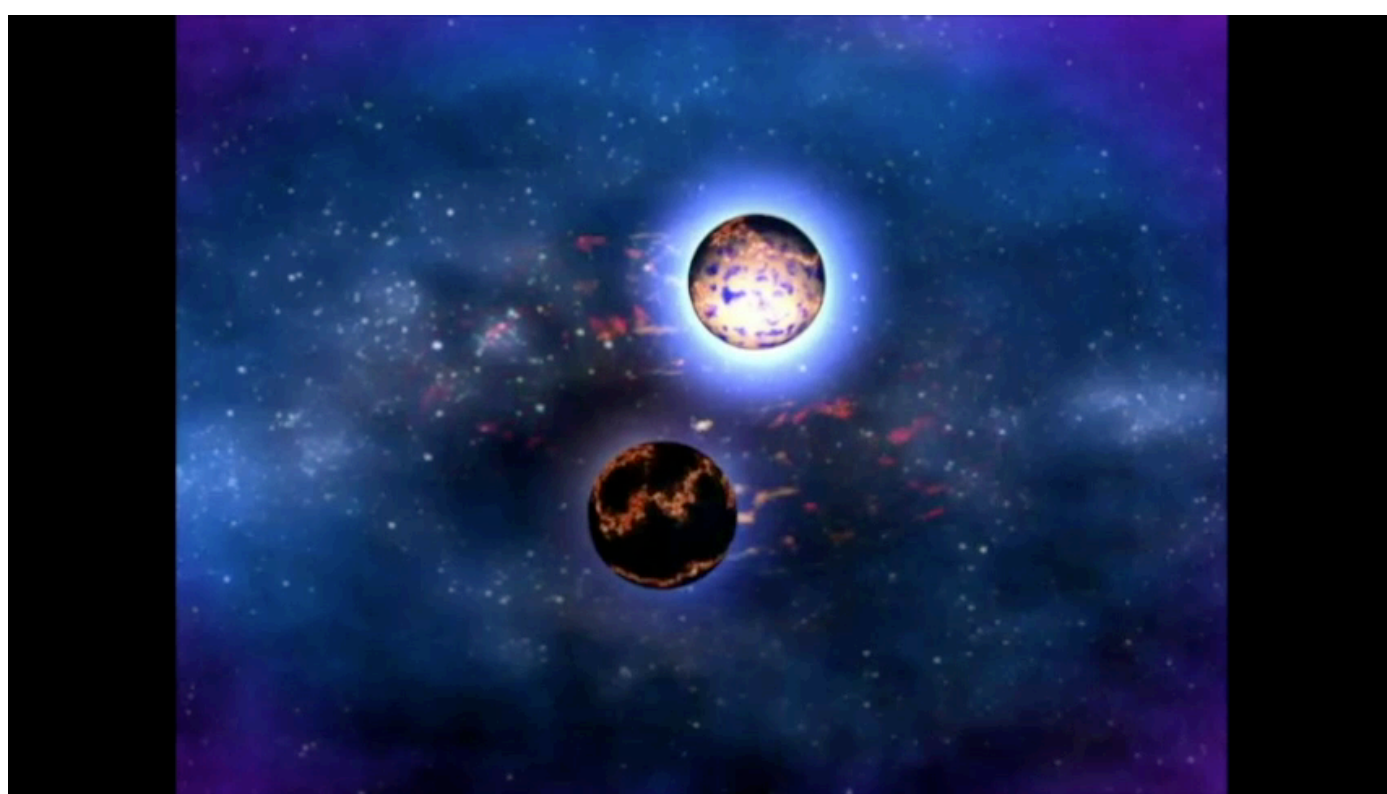
これまでの
BHBH合体
による重力波



今回のNSNS
合体による重力波

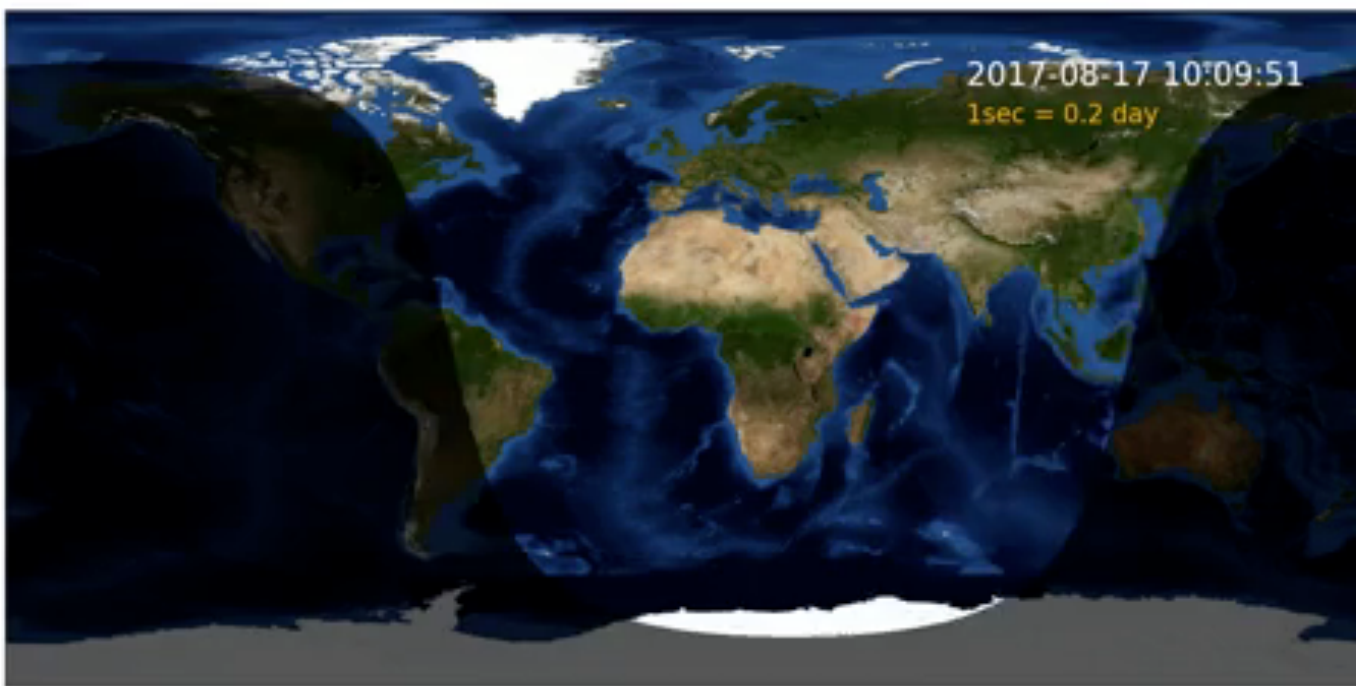
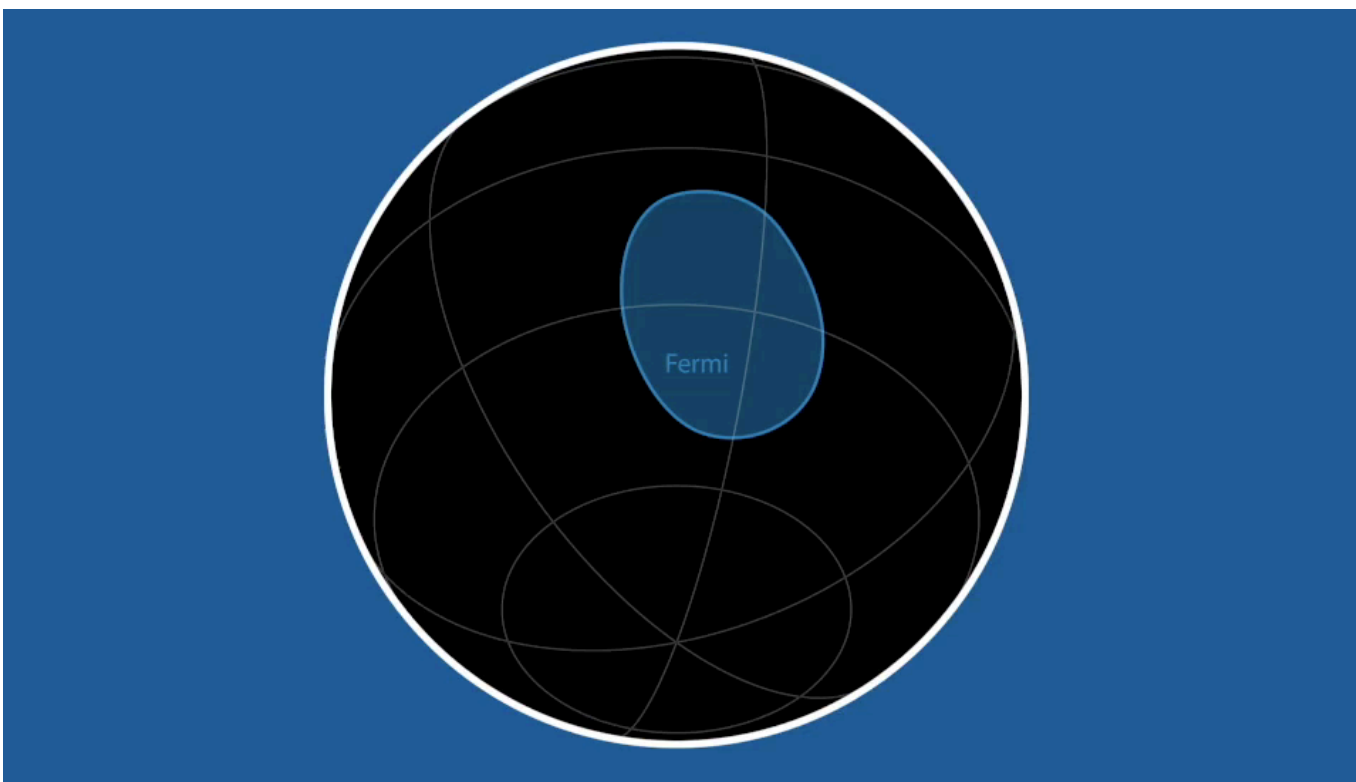
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



波源はNGC4993 (40Mpc先) !
1 億3000万光年先

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

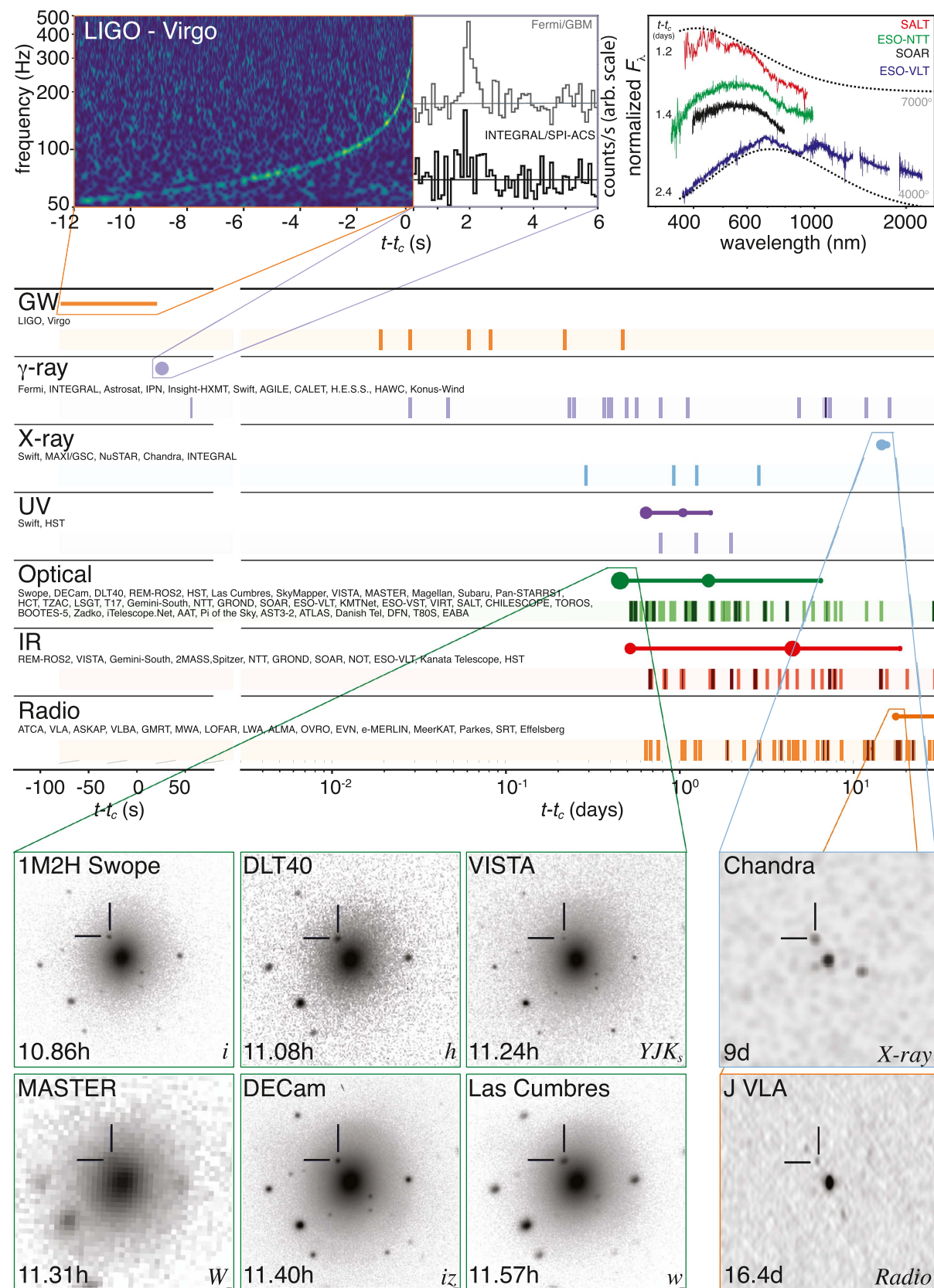


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band / messenger. First, the shaded dashes represent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

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

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

Gravitational wave lasted over 100 seconds

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

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

LIGO

Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics



周期表 (periodic table)

1
I A

1
1s

1
H
±1
水素
hydrogen
1.008

2
II A

4
2s

2
He
ヘリウム
helium
4.003

3
3s

3
Li
リチウム
lithium
6.941

4
4s

4
Be
ベリリウム
beryllium
9.012

5
5s

11
Na
ナトリウム
sodium
22.99

12
Mg
マグネシウム
magnesium
24.31

6
6s

19
K
カリウム
potassium
39.10

20
Ca
カルシウム
calcium
40.08

7
7s

37
Rb
ルビジウム
rubidium
85.47

38
Sr
ストロンチウム
strontium
87.62

8
8s

55
Cs
セシウム
cesium
132.9

56
Ba
バリウム
barium
137.3

9
9s

87
Fr
フランシウム
francium
223

88
Ra
ラジウム
radium
226

↑ 非金属元素

↓ 金属元素

3
III B

4
IV B

5
V B

6
VI B

7
VII B

8
VIII B

9
VIII B

10
VIII B

11
I B

12
II B

21
Sc
スカンジウム
scandium
44.96

22
Ti
チタン
titanium
47.87

23
V
バナジウム
vanadium
50.94

24
Cr
クロム
chromium
52.00

25
Mn
マンガン
manganese
54.94

26
Fe
鉄
iron
55.85

27
Co
コバルト
cobalt
58.93

28
Ni
ニッケル
nickel
58.69

29
Cu
銅
copper
63.55

30
Zn
亜鉛
zinc
65.41

39
Y
イットリウム
yttrium
88.91

40
Zr
ジルコニウム
zirconium
91.22

41
Nb
ニオブ
niobium
92.91

42
Mo
モリブデン
molybdenum
95.94

43
Tc
テクネチウム
technetium
98

44
Ru
ルテチウム
ruthenium
101.1

45
Rh
ロジウム
rhodium
102.9

46
Pd
パラジウム
palladium
106.4

47
Ag
銀
silver
107.9

48
Cd
カドミウム
cadmium
112.4

† 5d

57-71
ランタノイド
lanthanides

72
Hf
ハフニウム
hafnium
178.5

73
Ta
タンタル
tantalum
180.9

74
W
タングステン
tungsten
183.8

75
Re
レニウム
rhenium
186.2

76
Os
オスミウム
osmium
190.2

77
Ir
イリジウム
iridium
192.2

78
Pt
白金
platinum
195.1

79
Au
金
gold
197.0

80
Hg
水銀
mercury
200.6

‡ 6d

89-103
アクチノイド
actinides

104
Rf
ラザホージウム
rutherfordium
261

105
Db
ドブニウム
dubnium
262

106
Sg
シーボーギウム
seaborgium
266

107
Bh
ボーリウム
bohrium
264

108
Hs
ハッシウム
hassium
277

109
Mt
マイトネリウム
meitnerium
268

110
Ds
ダームスタチウム
darmstadtium
281

111
Rg
レントゲニウム
roentgenium
272

112
Cn
コペルニシウム
copernicium
285

原子番号 →

29
+2,1

← 通常できるイオンの価数

元素記号 →

Cu

← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素

元素名(日本語) →

銅

元素名(英語) →

copper

← 原子量

63.55

→ 非金属元素

↓ 金属元素

13
III A

14
IV A

15
V A

16
VI A

17
VII A

18
VIII A

5
2p

5
B
ホウ素
boron
10.81

6
C
炭素
carbon
12.01

7
N
窒素
nitrogen
14.01

8
O
酸素
oxygen
16.00

9
F
フッ素
fluorine
19.00

10
Ne
ネオン
neon
20.18

13
3p

13
Al
アルミニウム
aluminum
26.98

14
Si
ケイ素
silicon
28.09

15
P
リン
phosphorus
30.97

16
S
硫黄
sulfur
32.07

17
Cl
塩素
chlorine
35.45

18
Ar
アルゴン
argon
39.95

4
4p

31
Ga
ガリウム
gallium
69.72

32
Ge
ゲルマニウム
germanium
72.64

33
As
ヒ素
arsenic
74.92

34
Se
セレン
selenium
78.96

35
Br
臭素
bromine
79.90

36
Kr
クリプトン
krypton
83.80

5
5p

49
In
インジウム
indium
114.8

50
Sn
スズ
tin
118.7

51
Sb
アンチモン
antimony
121.8

52
Te
テルル
tellurium
127.6

53
I
ヨウ素
iodine
126.9

54
Xe
キセノン
xenon
131.3

6
6p

81
Tl
タリウム
thallium
204.4

82
Pb
鉛
lead
207.2

83
Bi
ビスマス
bismuth
209.0

84
Po
ポロニウム
polonium
209

85
At
アスタチン
astatine
210

86
Rn
ラドン
radon
222

7
7p

113
Nh
ニホニウム
nihonium
284

114
Fl
フレロビウム
flerovium
289

115
Mc
モスコビウム
moscovium
288

116
Lv
リバモリウム
livermorium
292

117
Ts
テネシン
tennessine
293

118
Og
オガネソン
oganesson
294

↑ 非金属元素

↓ 金属元素

57
+3

58
+3,4

59
+3,4

60
+3

61
+3

62
+3,2

63
+3,2

64
+3

65
+3,4

66
+3

67
+3

68
+3

69
+3,2

70
+3,2

71
+3

† 4f

57
La
ランタン
lanthanum
138.9

58
Ce
セリウム
cerium
140.1

59
Pr
プラセオジウム
praseodymium
140.9

60
Nd
ネオジウム
neodymium
144.2

61
Pm
プロメチウム
promethium
145

62
Sm
サマリウム
samarium
150.4

63
Eu
ユウロビウム
europium
152.0

64
Gd
ガドリニウム
gadolinium
157.3

65
Tb
テルビウム
terbium
158.9

66
Dy
ジスプロシウム
dysprosium
162.5

67
Ho
ホルミウム
holmium
164.9

68
Er
エルビウム
erbium
167.3

69
Tm
ツリウム
thulium
168.9

70
Yb
イッテルビウム
ytterbium
173.0

71
Lu
ルテチウム
lutetium
175.0

‡ 5f

89
Ac
アクチニウム
actinium
227

90
Th
トリウム
thorium
232.0

91
Pa
プロトアクチニウム
protactinium
231.0

92
U
ウラン
uranium
238.0

93
Np
ネプツニウム
neptunium
237

94
Pu
プルトニウム
plutonium
239

95
Am
アメリシウム
americium
243

96
Cm
キュリウム
curium
247

97
Bk
バーケリウム
berkelium
247

98
Cf
カリホルニウム
californium
251

99
Es
アインスタイニウム
einsteinium
252

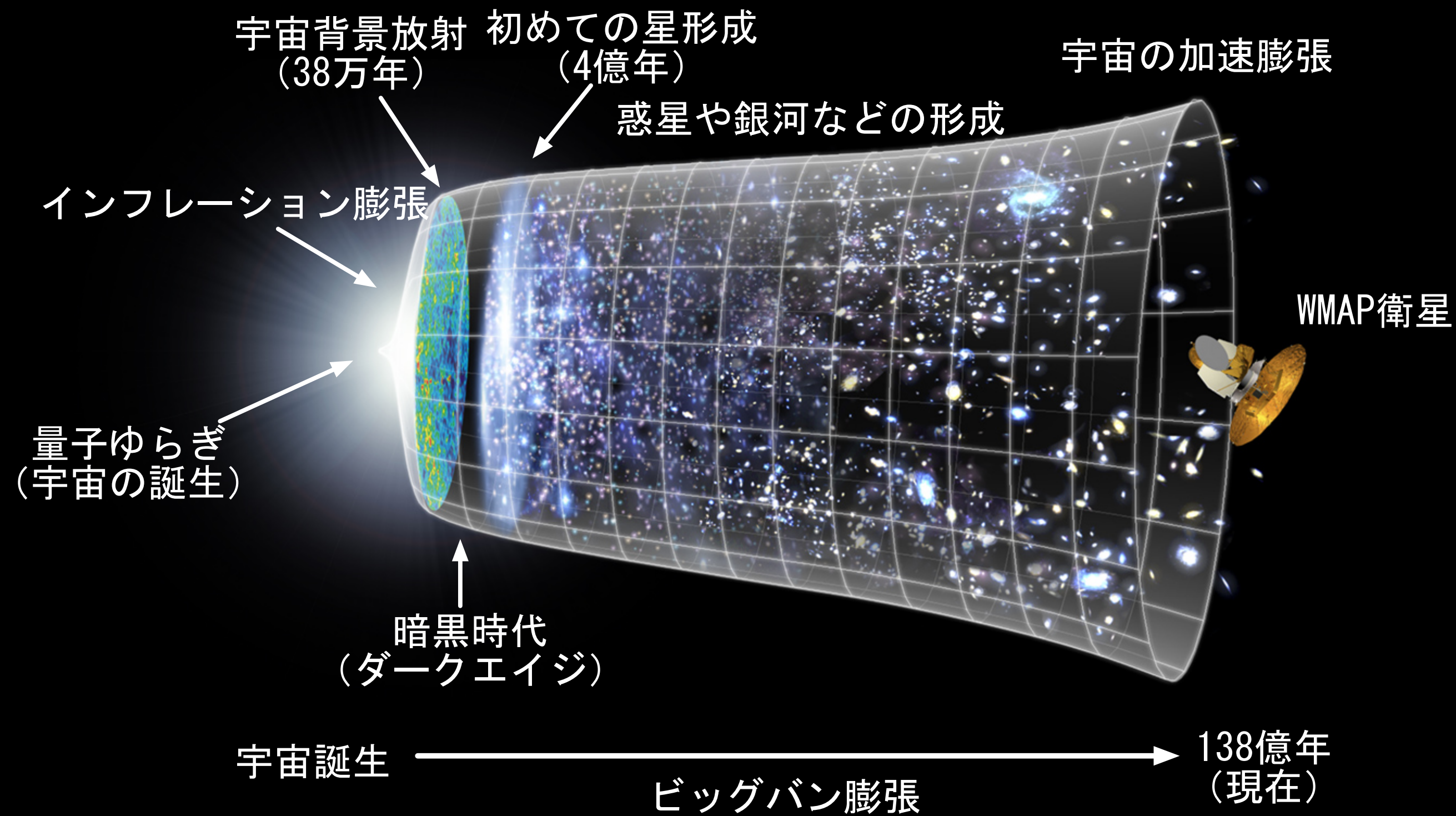
100
Fm
フェルミウム
fermium
257

101
Md
メンデレビウム
mendelevium
258

102
No
ノーベリウム
nobelium
259

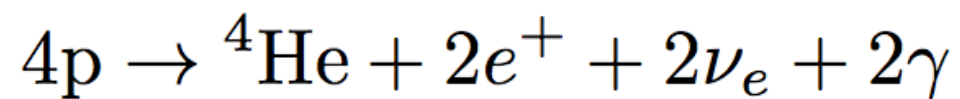
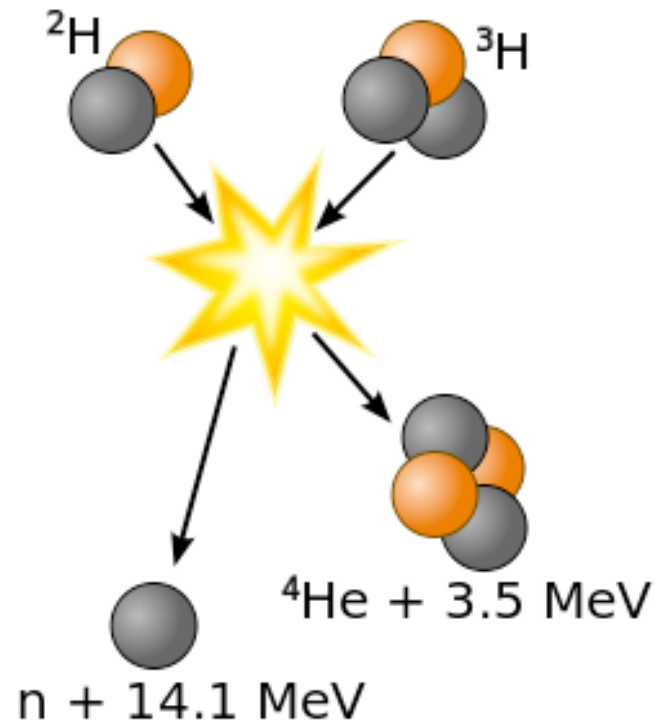
103
Lr
ローレンシウム
lawrencium
262

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



核反応 原子核の組み替えによって莫大なエネルギーが放出

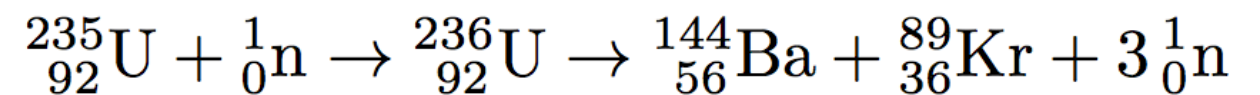
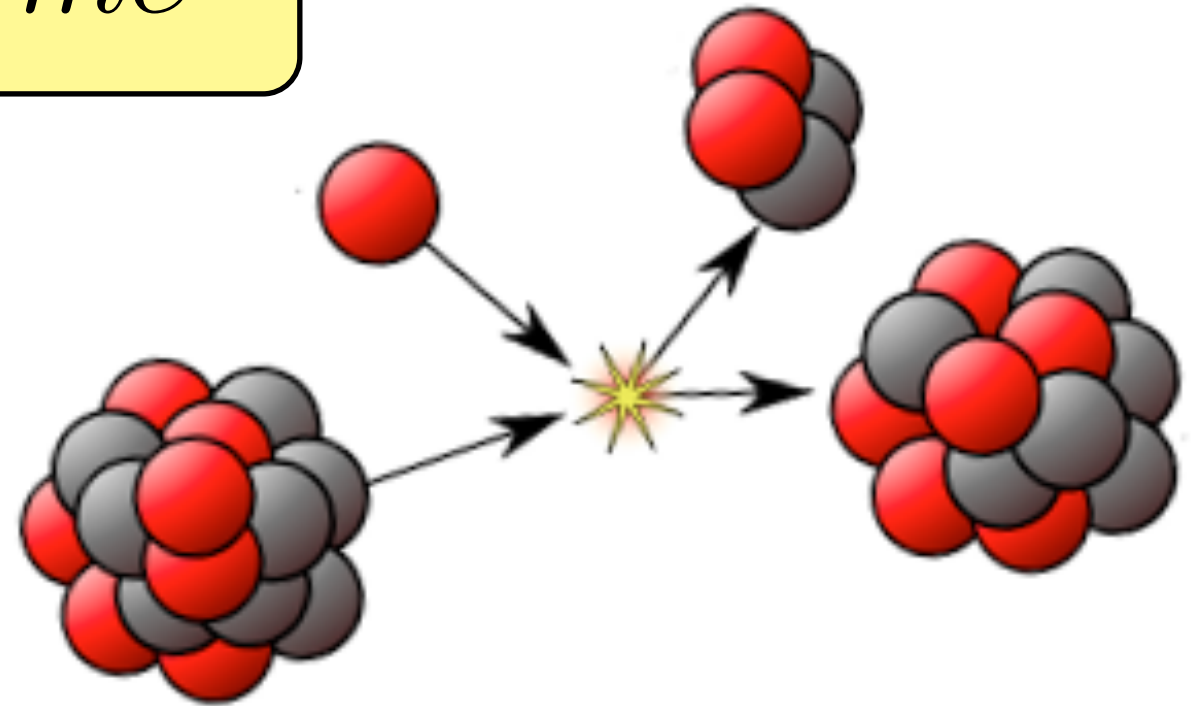
$$E = mc^2$$



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)



核分裂

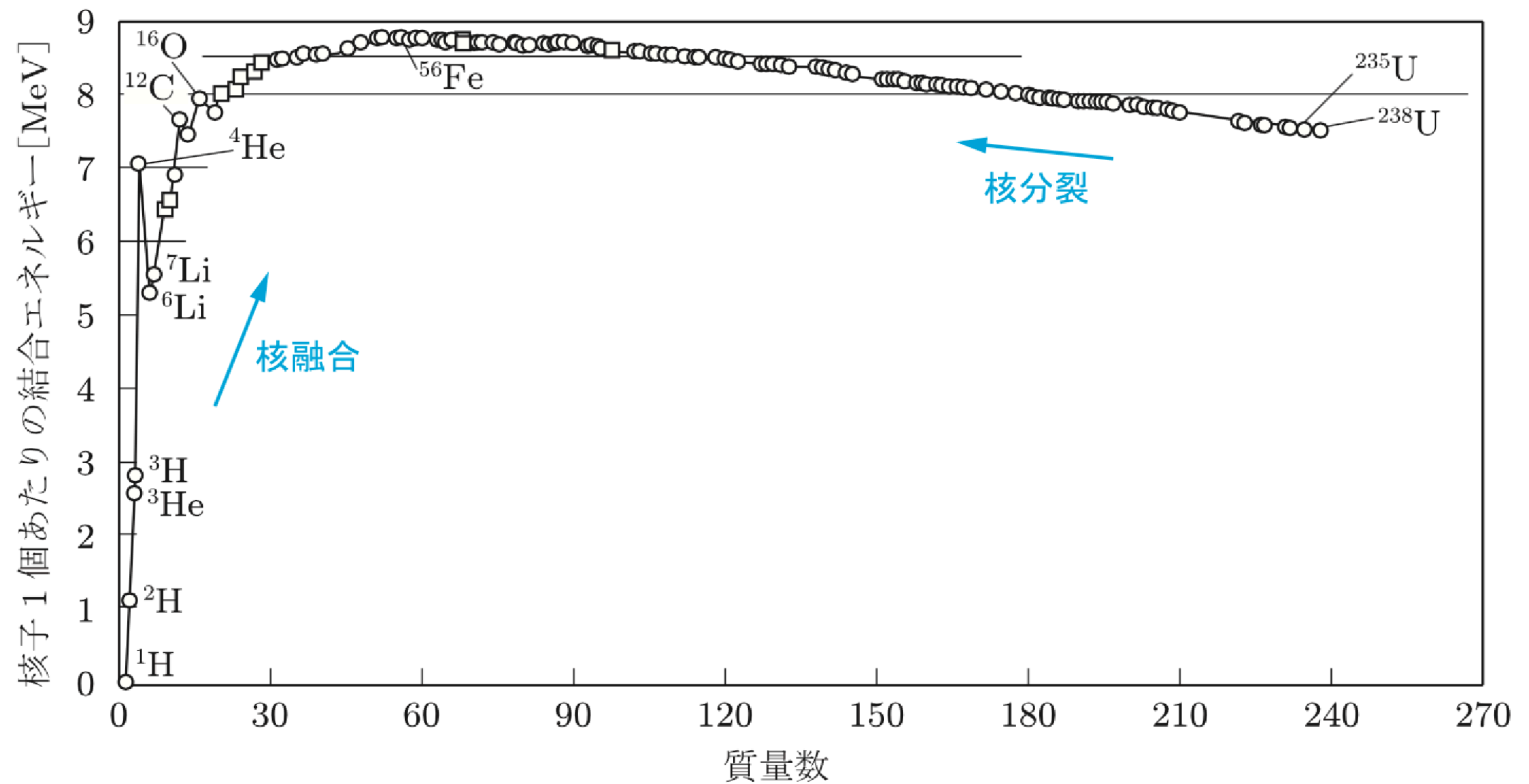
(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

結合エネルギー

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

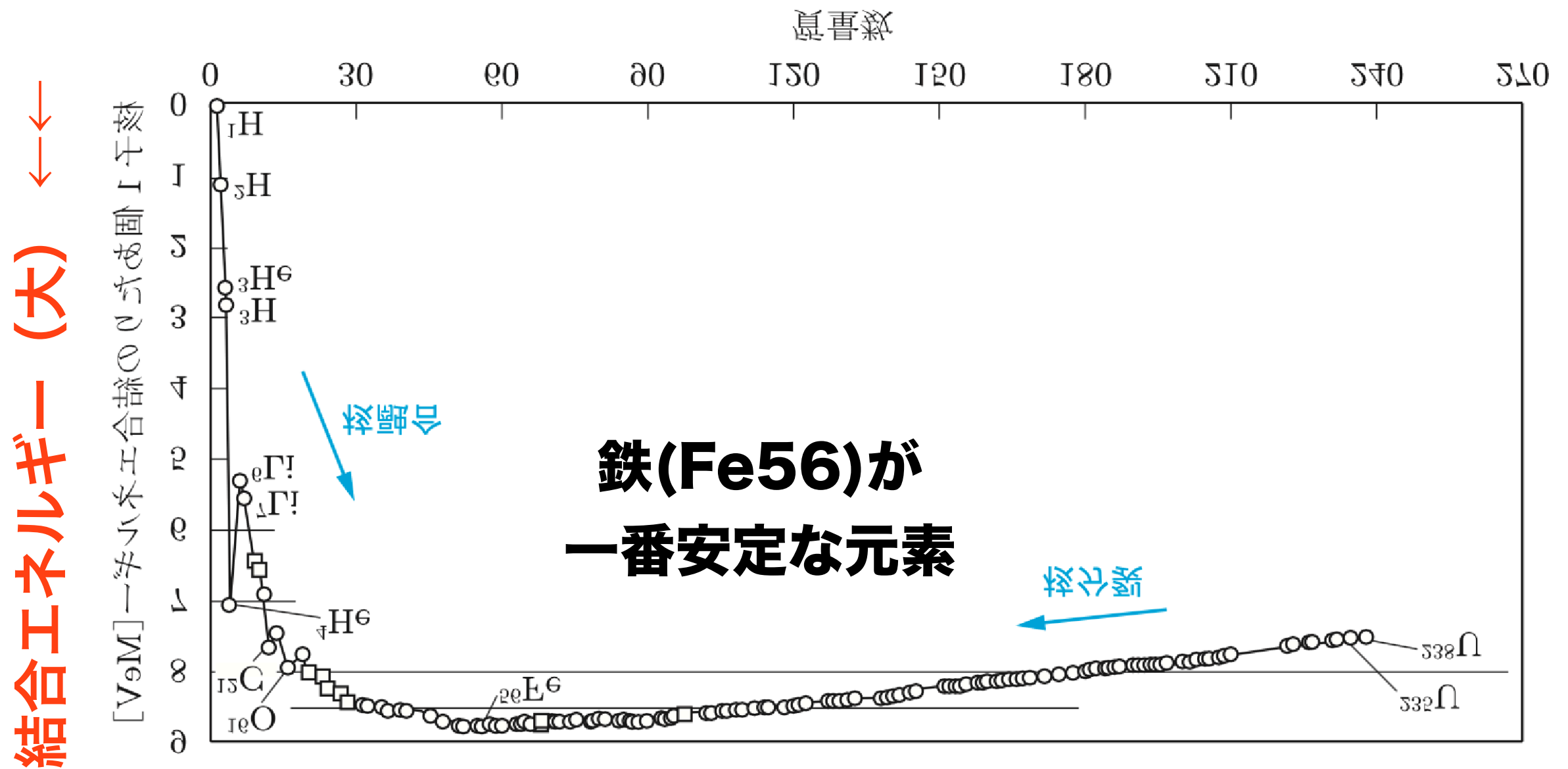
↑
↑
結合エネルギー (大)

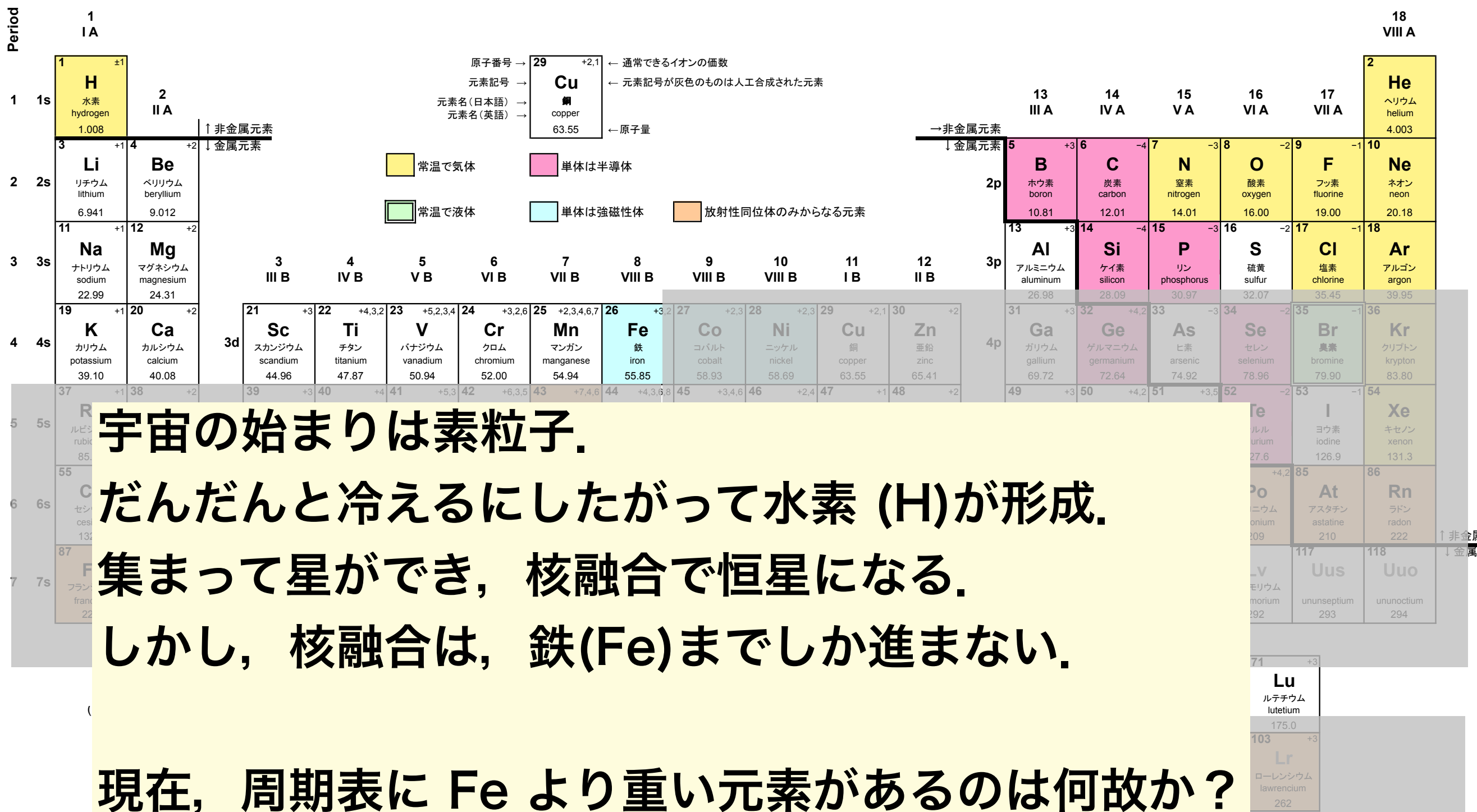


→ → 質量数 (大)

結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？





超新星爆発で作られた！

中性子星連星合体で作られた！

世界の重力波観測ネットワーク

4 km



4 km



600 m



3 km



3 km

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector

大型低温重力波望遠鏡



神岡鉱山
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度 (20K) まで
冷却

熱雑音を小さくするため

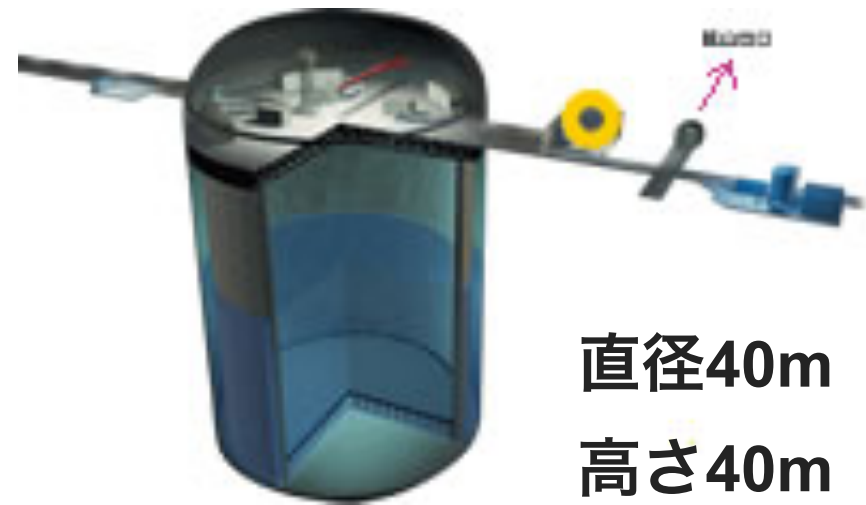
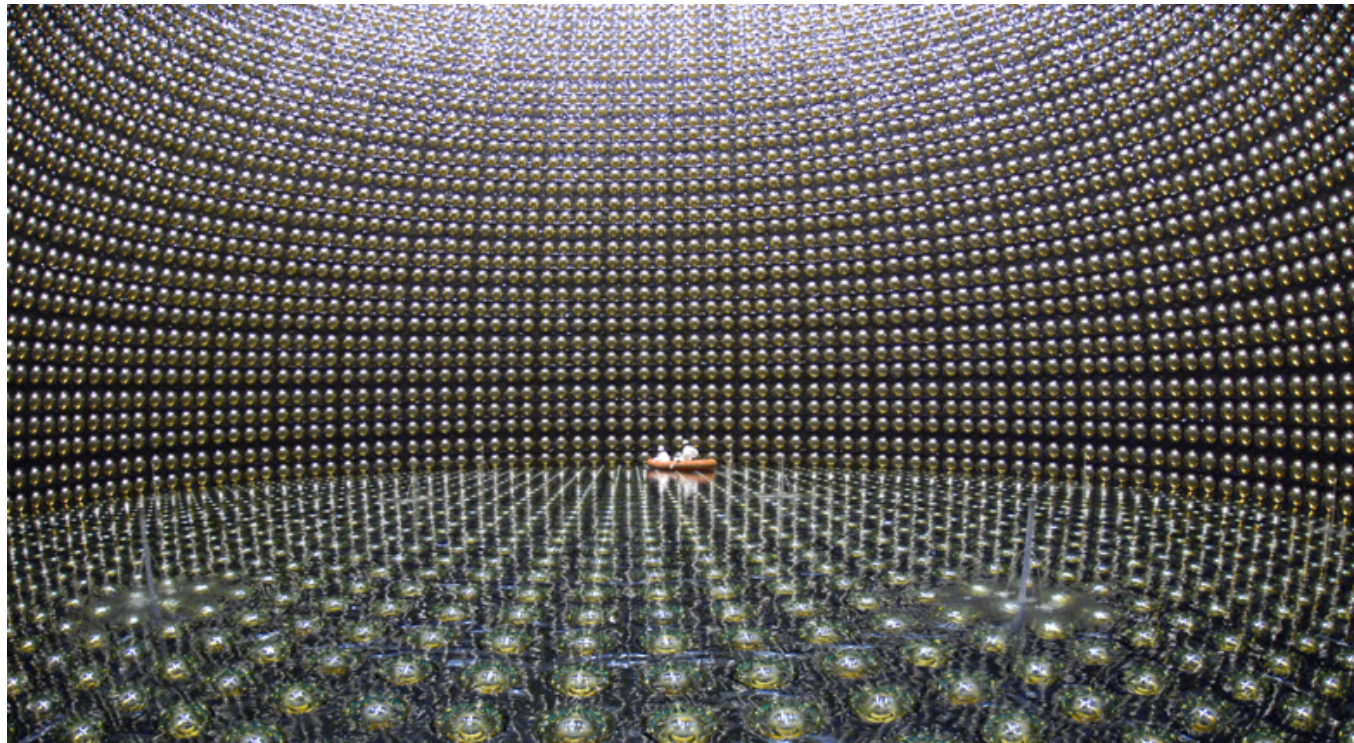
鏡の材質としてサファイア

光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

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



直径40m

高さ40m

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



ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊 (2002年)



梶田隆章 (2015年)



大型低温重力波望遠鏡



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



KAGRA（かぐら：大型低温重力波望遠鏡） 干渉計の工夫

長い腕が欲しい. 750km位の長さ

▶ 300回往復させよう

強いレーザーが欲しい.

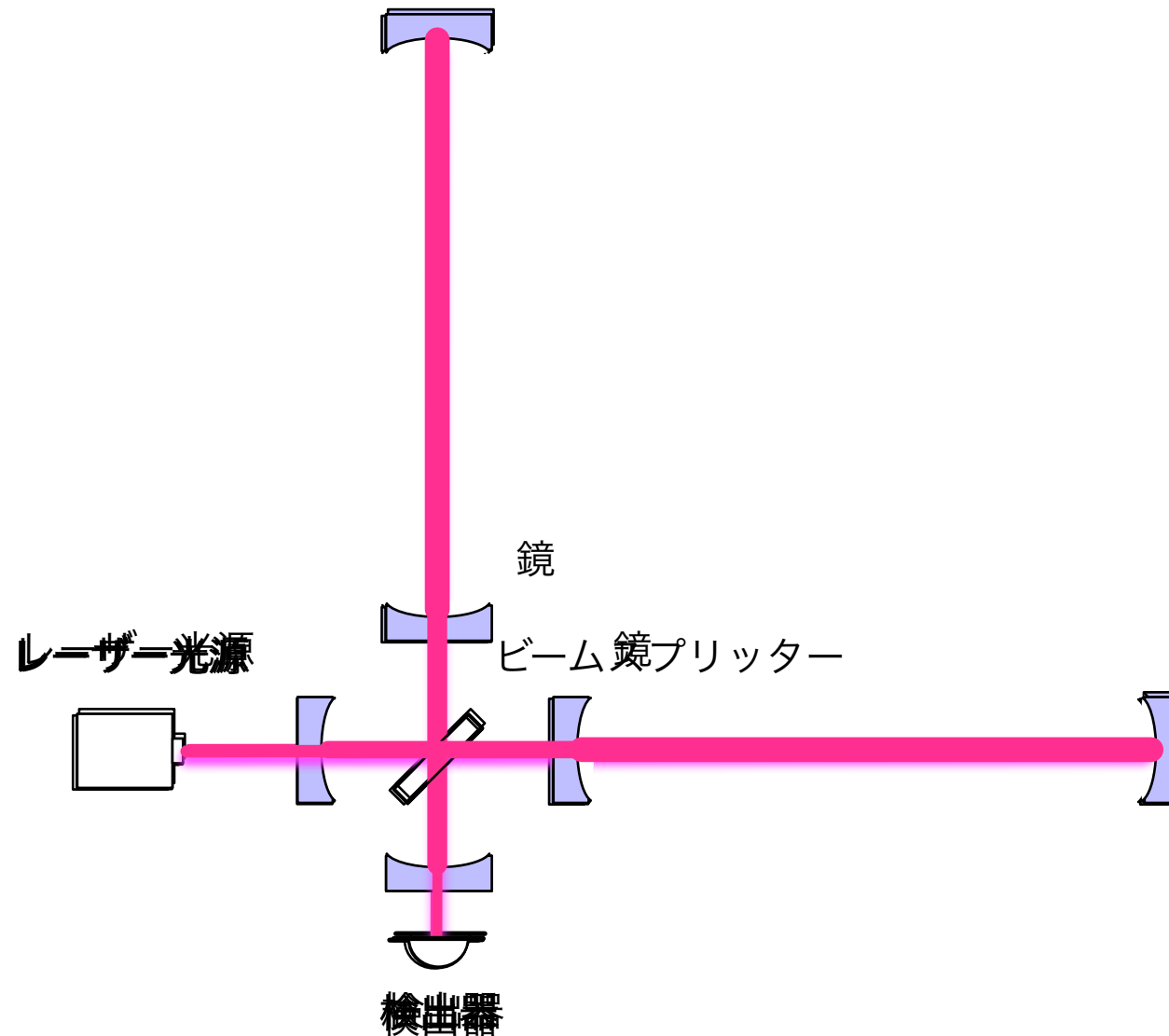
▶ 100回共鳴させよう

信号がまだ弱い

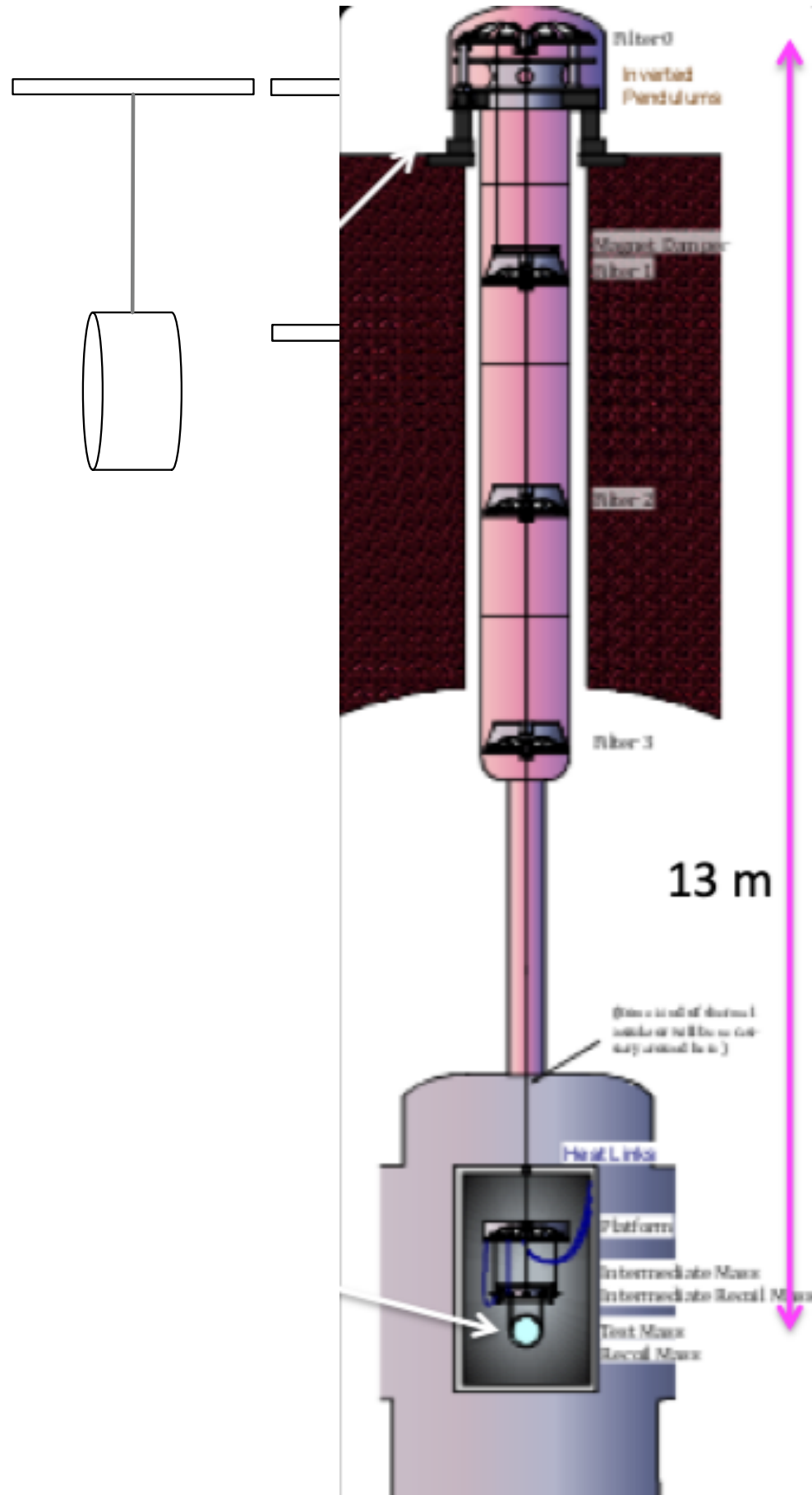
▶ 信号も共鳴させよう

レーザーがまだ弱い

▶ 強いレーザーを開発



KAGRA（かぐら：大型低温重力波望遠鏡） 干渉計の工夫



鏡が地面振動で揺れたら困る

▶ 吊り下げよう

高周波振動抑えたい

▶ 2段にしよう

▶ 3段にしよう

▶ 4段にしよう

低周波振動抑えたい

▶ ひもを長くしよう

高さ13.5m

トンネルの2層目から吊り下げる

KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡) 干渉計の工夫



鏡が熱振動で揺れたら困る

▶ 温度を下げよう

20K (マイナス250度)

低温で耐えられる素材は？

▶ 人工サファイア

22.8 kg

diameter 22cm

thickness 15cm

低温にする装置は？

対流 x

放射 x

伝導 ○

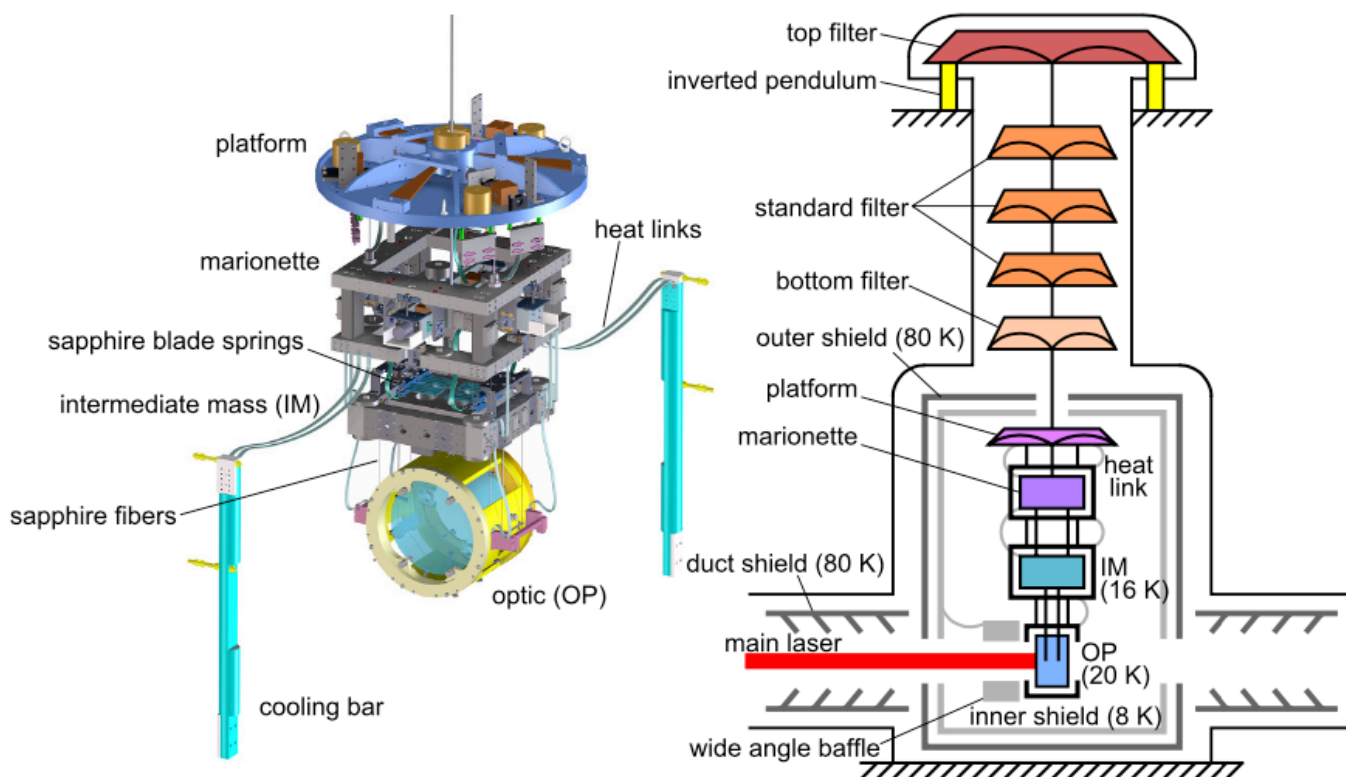
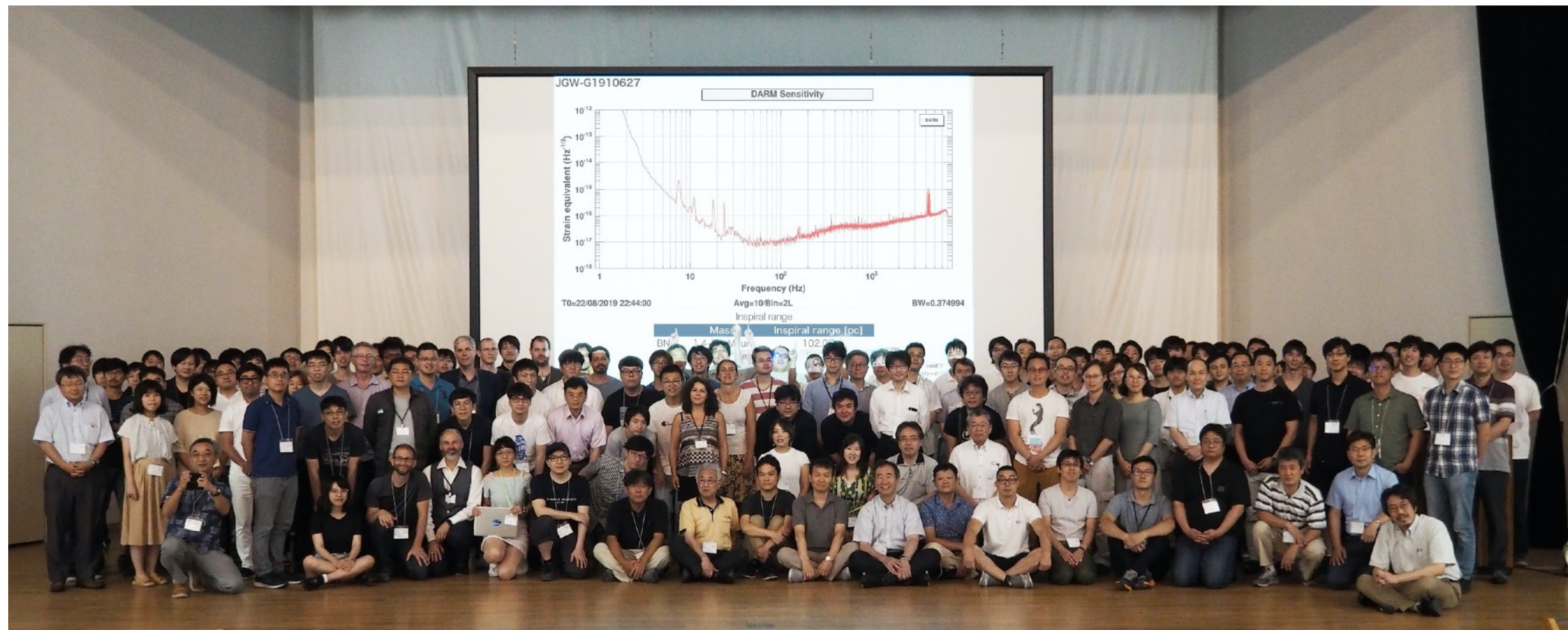


Figure 3. The CAD drawing of the cryogenic payload under Type-A (left) and the schematic of the cryogenic suspension system of sapphire test masses (right). Suspension stages outside of the outer shield are at room temperature.

KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

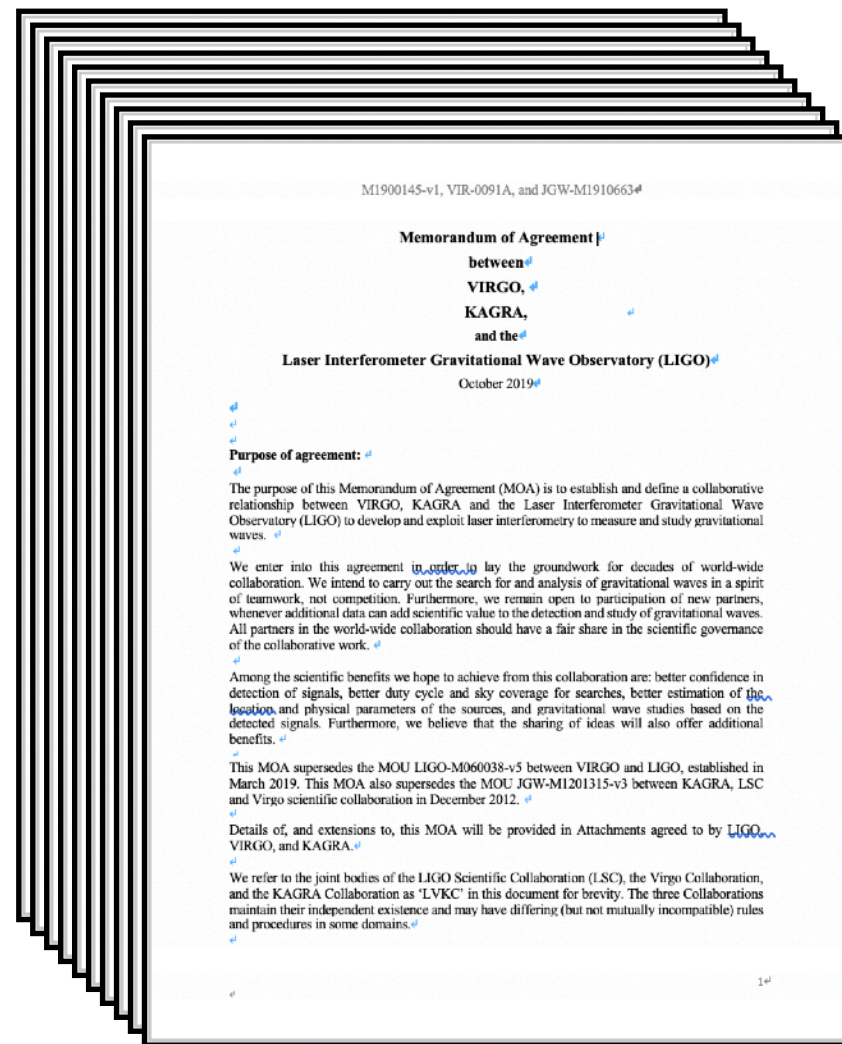


KAGRA

440 members
200 authors
110 groups
14 regions

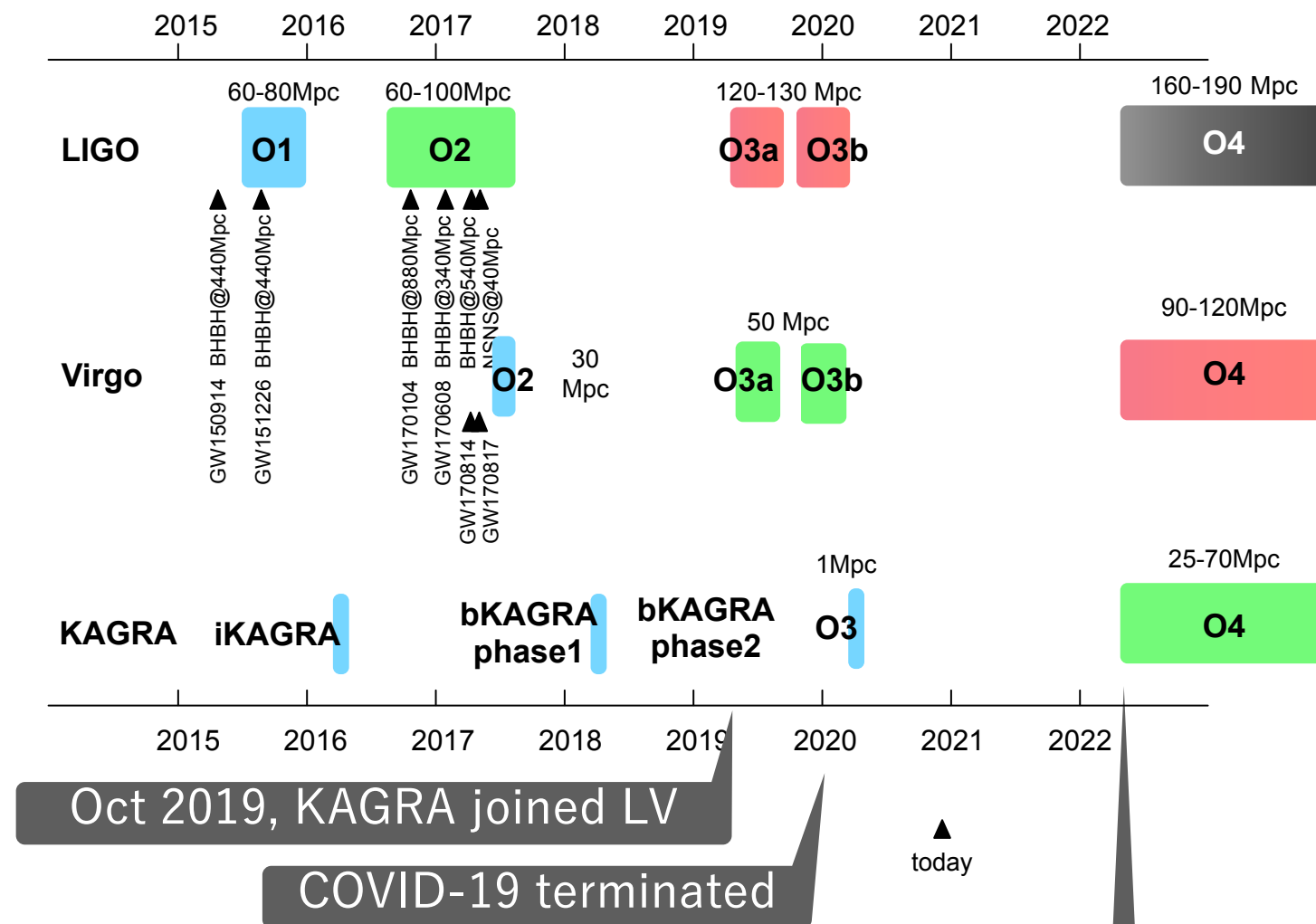
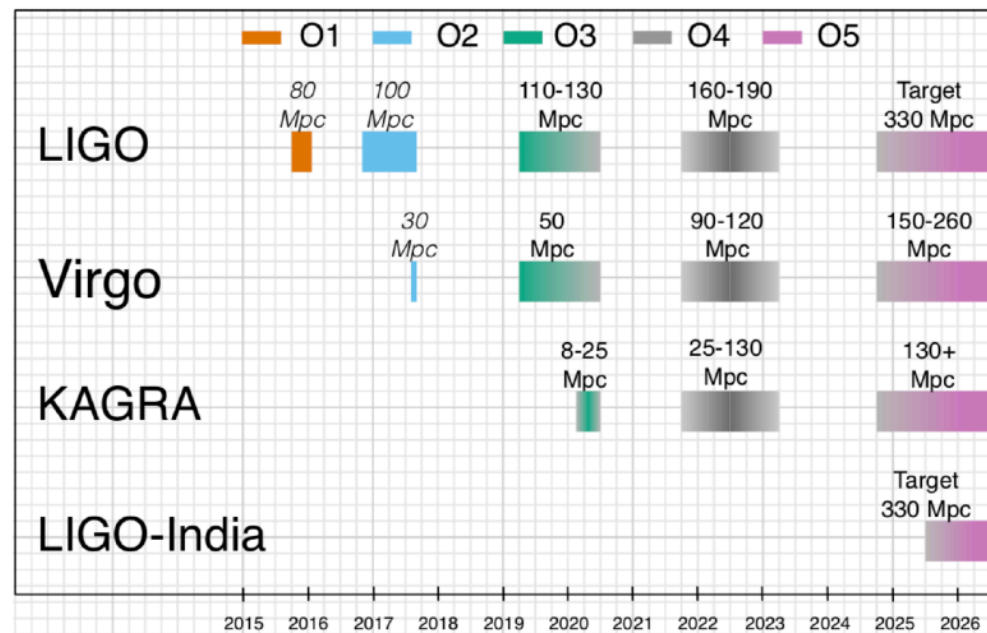


KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

Target Sensitivity & Schedule



O4 will likely start no earlier than August 2022

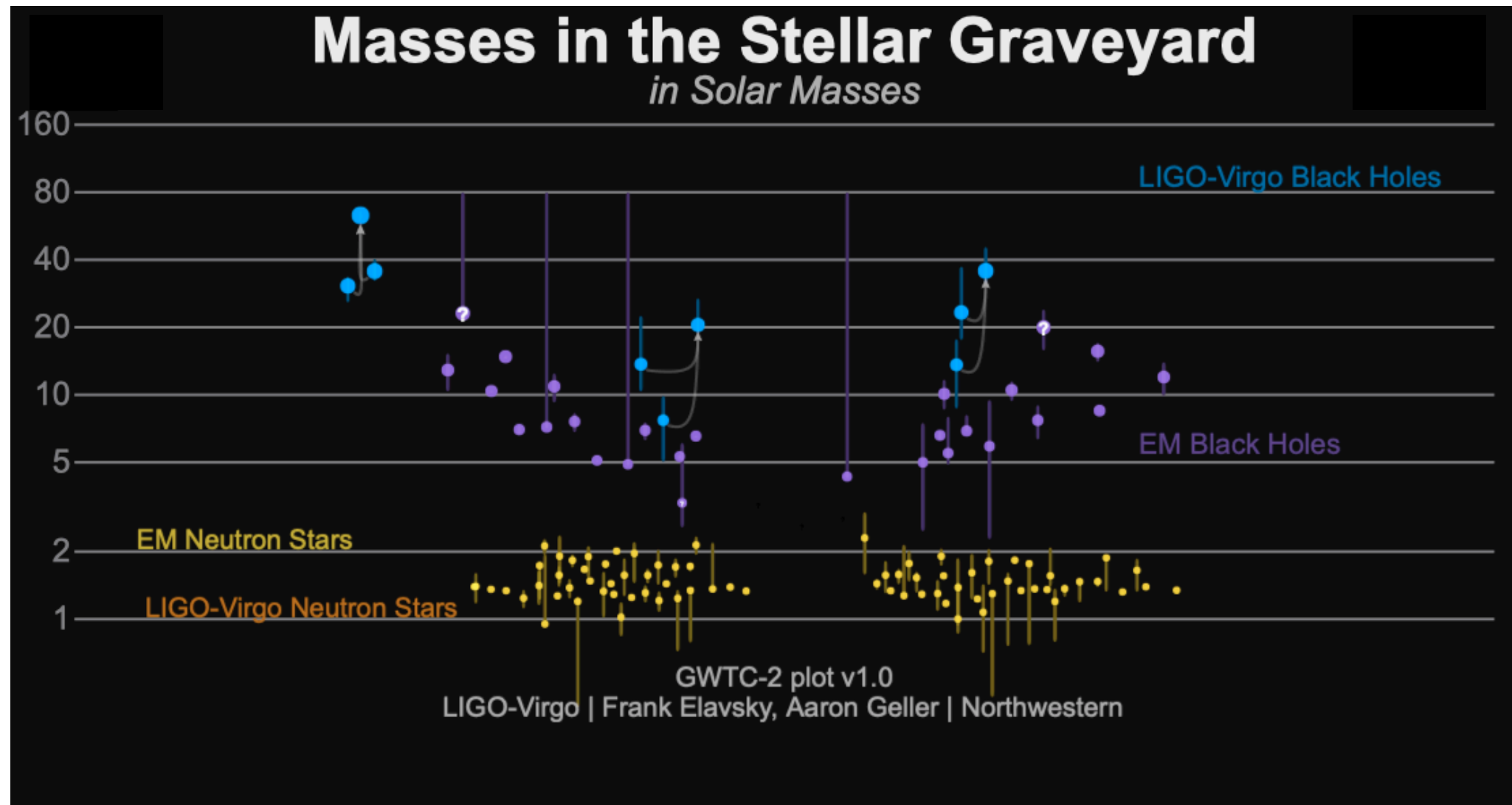
“Scenario Paper” [1304.0670ver2020Jan]

LVK collaboration, Living Rev Relativ (2020) 23:3

<https://link.springer.com/article/10.1007/s41114-020-00026-9>

- O1 (2015/9/12 - 2016/1/19) LIGO
- O2 (2016/11/30 - 2017/8/25) LIGO+Virgo
- O3a (2019/4/1 - 2019/9/30) LIGO+Virgo
- O3b (2019/10/1 - 2020/3/27) LIGO+Virgo + KAGRA

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



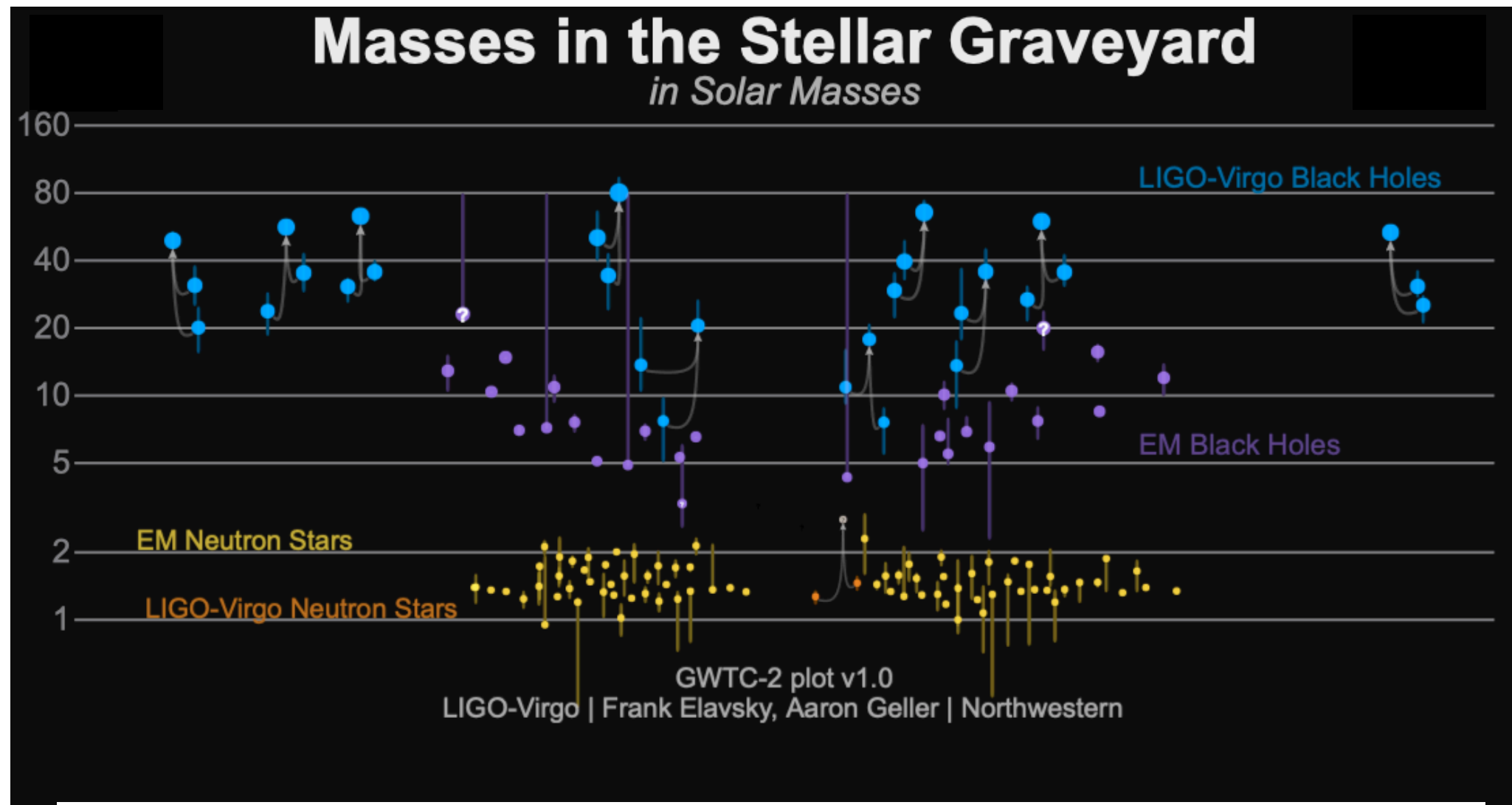
3 BHBH

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

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

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

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



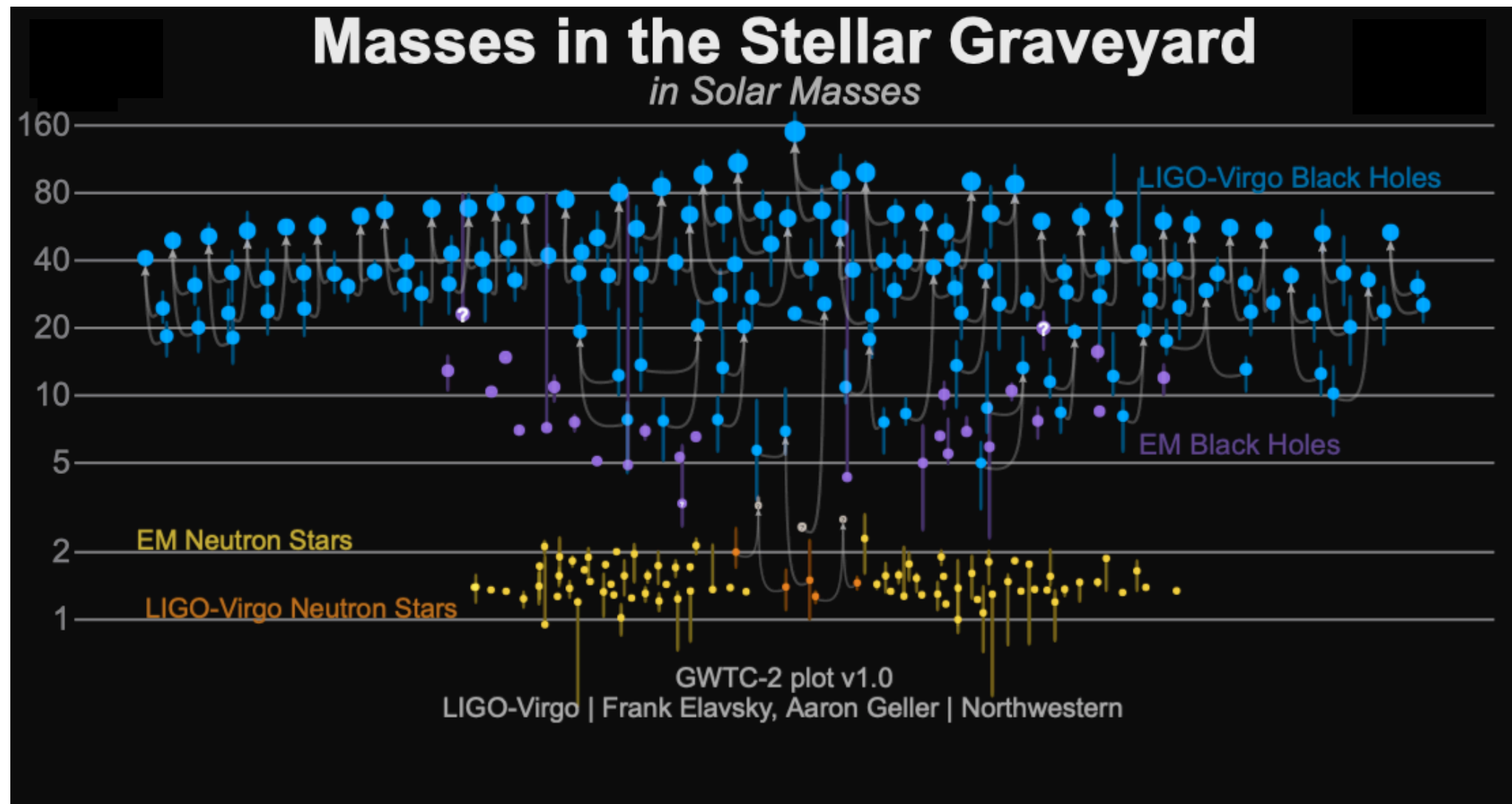
10 BHBH
1 NSNS

- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic spectrum.
<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

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

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

これまでに50以上の重力波が見つかったが、相対性理論の予言どおり



46 BHBH
2 NSNS
2 BH+?

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

マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

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

ガンマ線

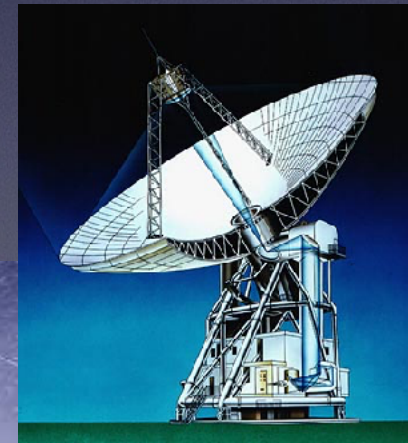
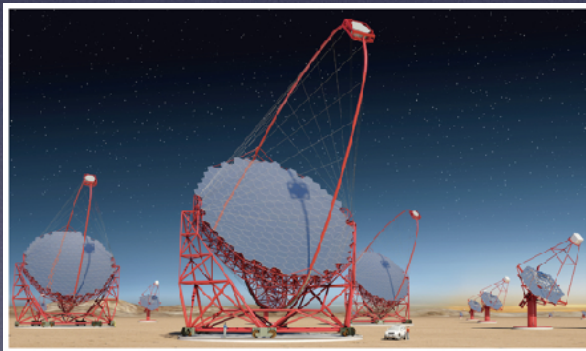
X線

可視光

赤外

電波

重力波

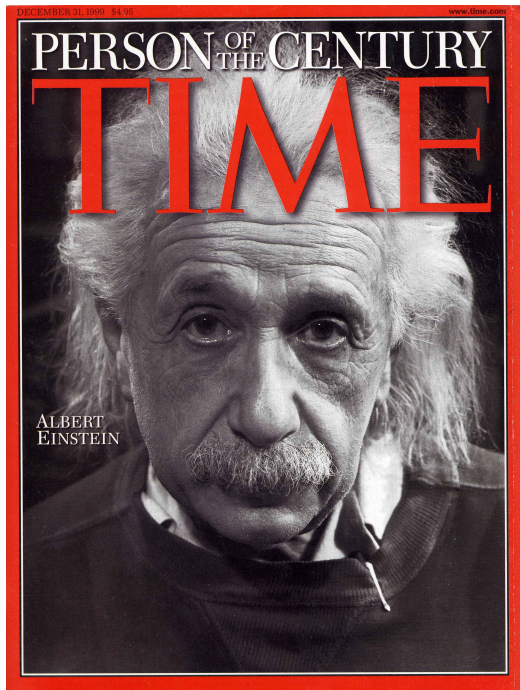


重力波天文学
は
じ
め
ま
し
た。



アインシュタインはどこまで正しい？

検証が進む相対性理論



Time
1999/12/31

1. ニュートンの力学（1687年）
2. 2つの相対性理論（1905年, 1915年）
3. ブラックホールの観測
4. 重力波の検出
5. 時計を使った相対性理論の検証

真貝寿明（しんかい ひさあき）

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

2021/7/18 第11回高校生天文活動発表会



GPS (Global Positioning System)

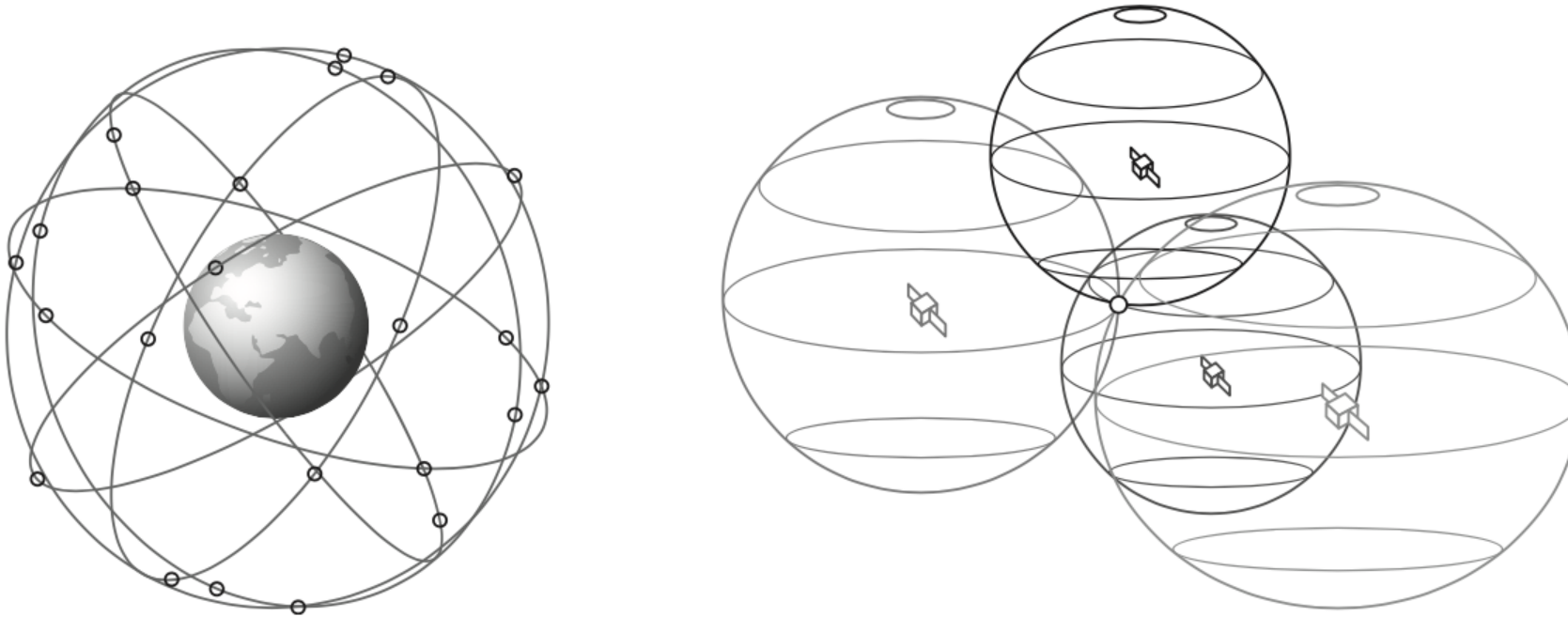


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



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

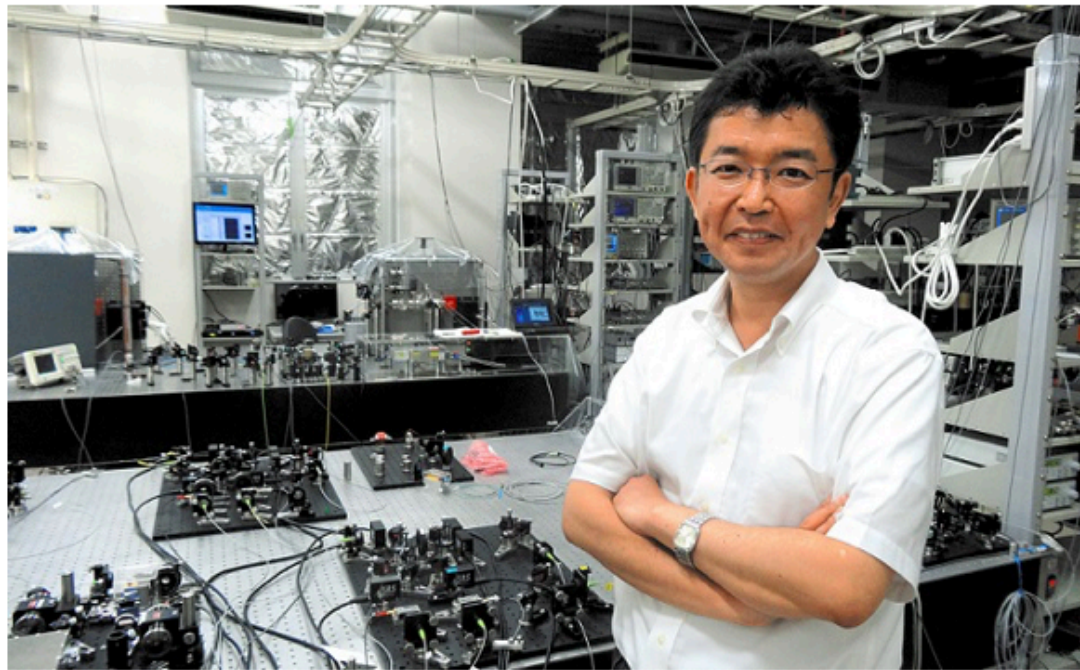
地球重力の一般相対論効果

⇒ 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

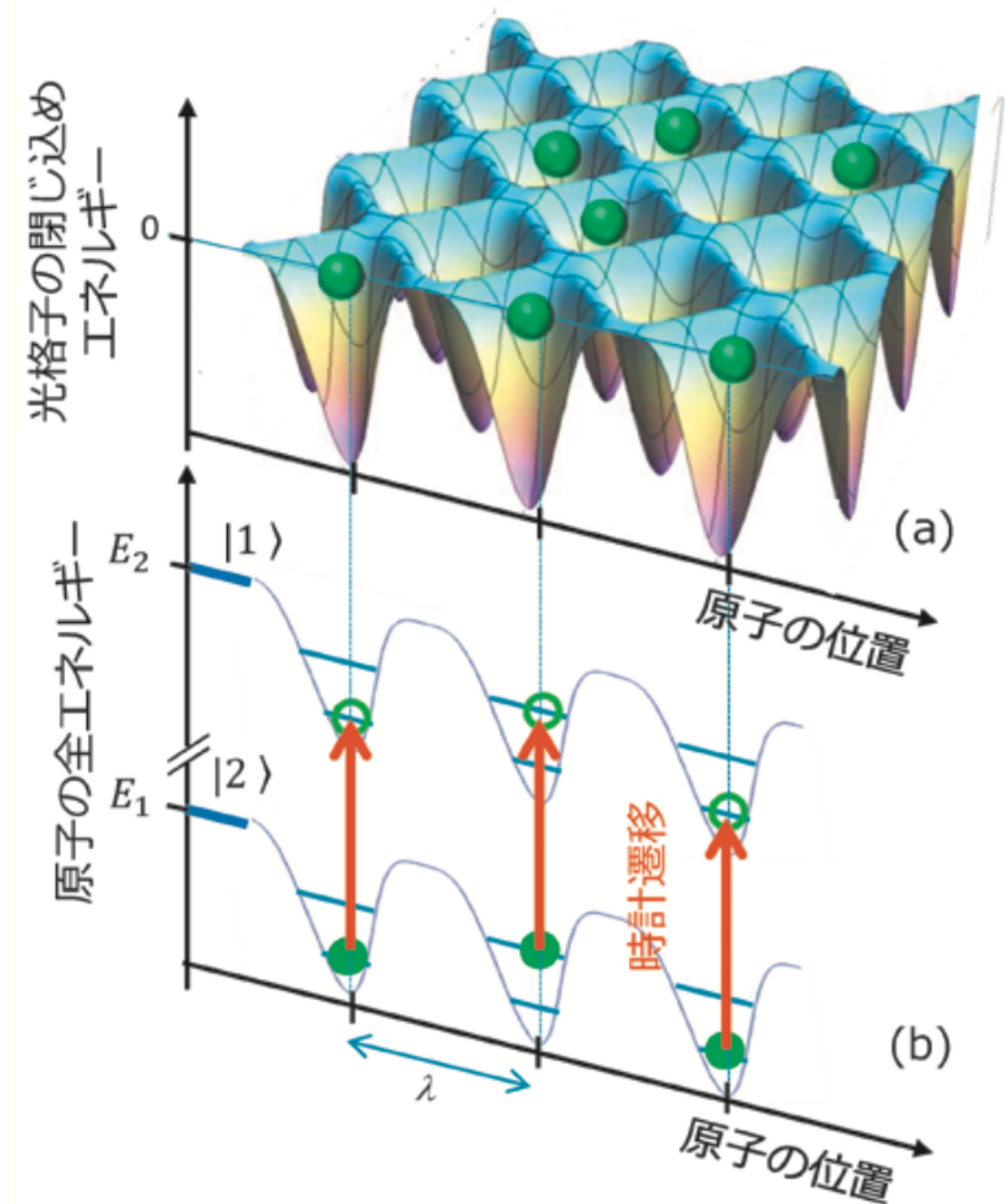
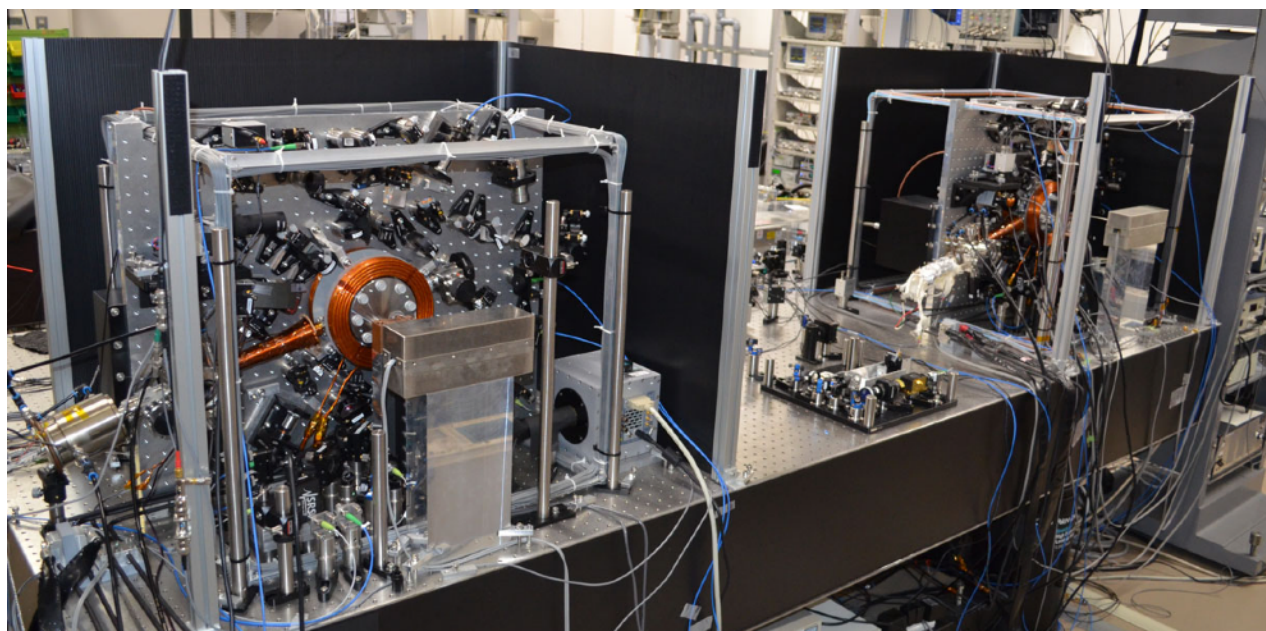


時間を測る

もっとも精密な時計＝光格子時計



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



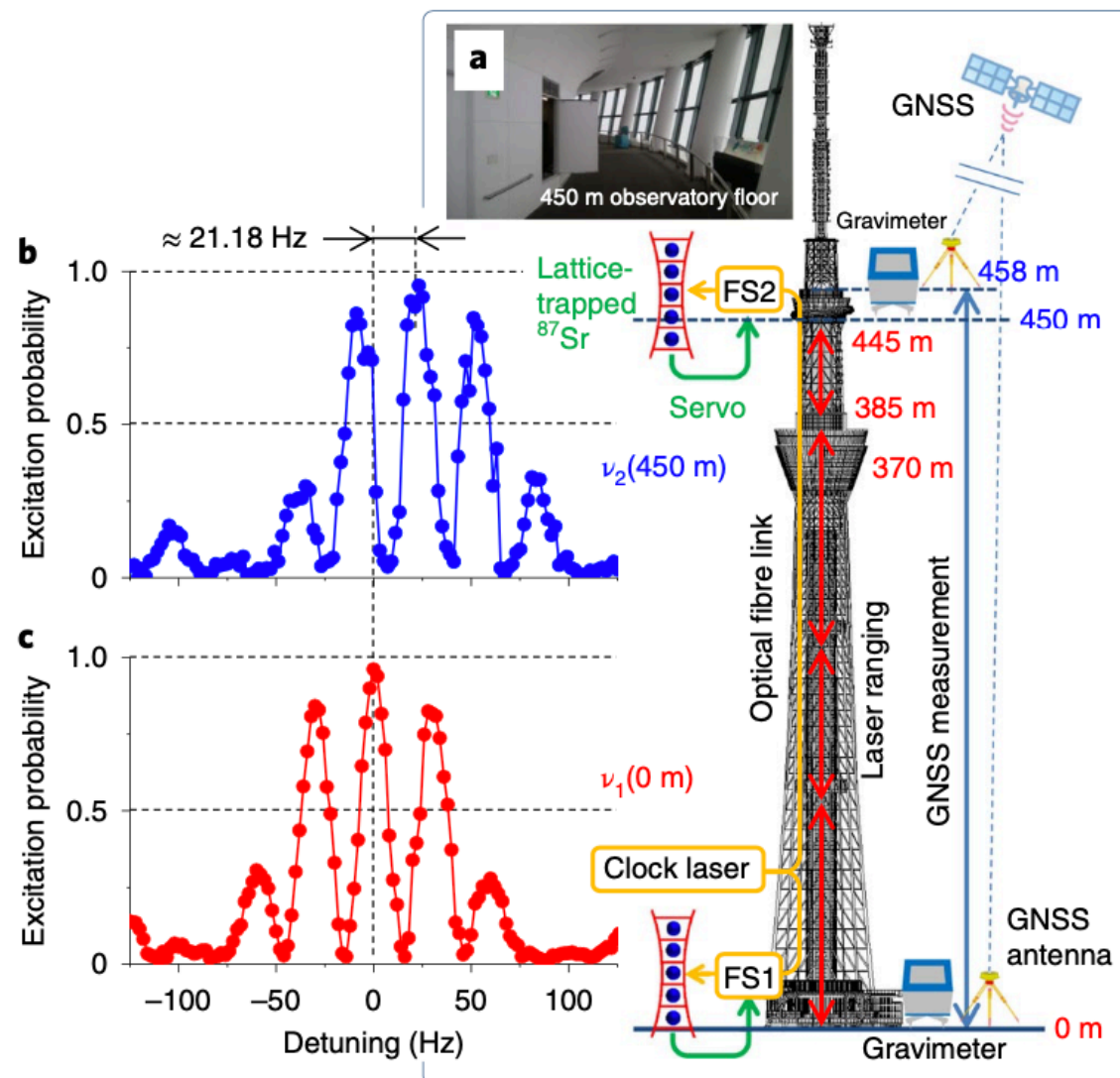
10^{-18} の精度を実現
(300億年ですれは1秒以内)

スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

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

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

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



Nature Photonics, 14 (2020) 411

nature
photonics

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8>

Check for updates

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

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

スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

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

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

1 週間の計測. 平均して, 差が

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

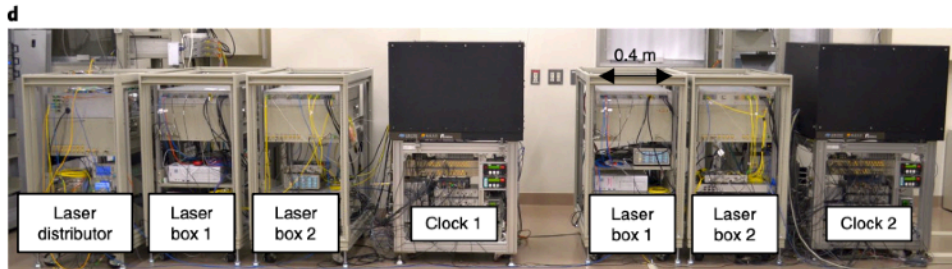
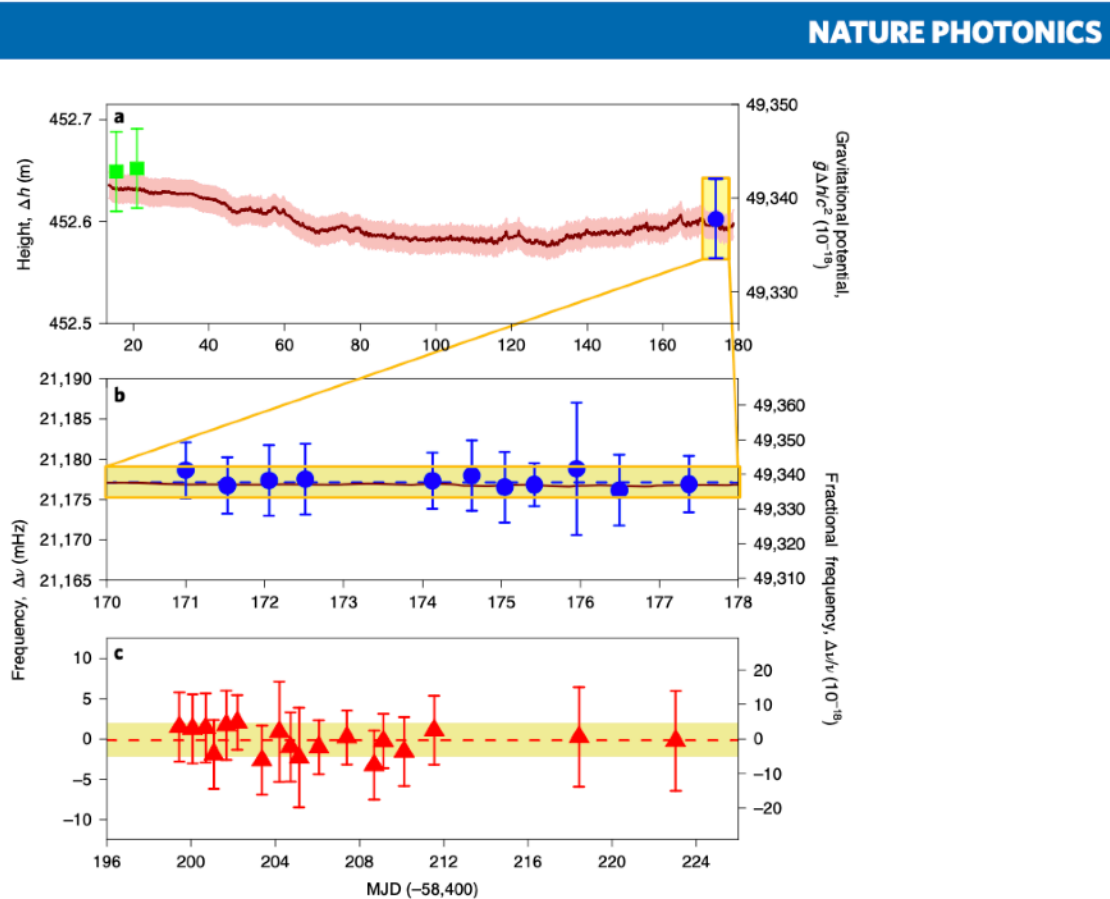
レーザー測距では

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

相対性理論の正しさを

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

の精度で検証したことになる



もっとも精密な時計＝光格子時計

冷蔵庫サイズの時計で、高度差450mを±数cmで測定できる。

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

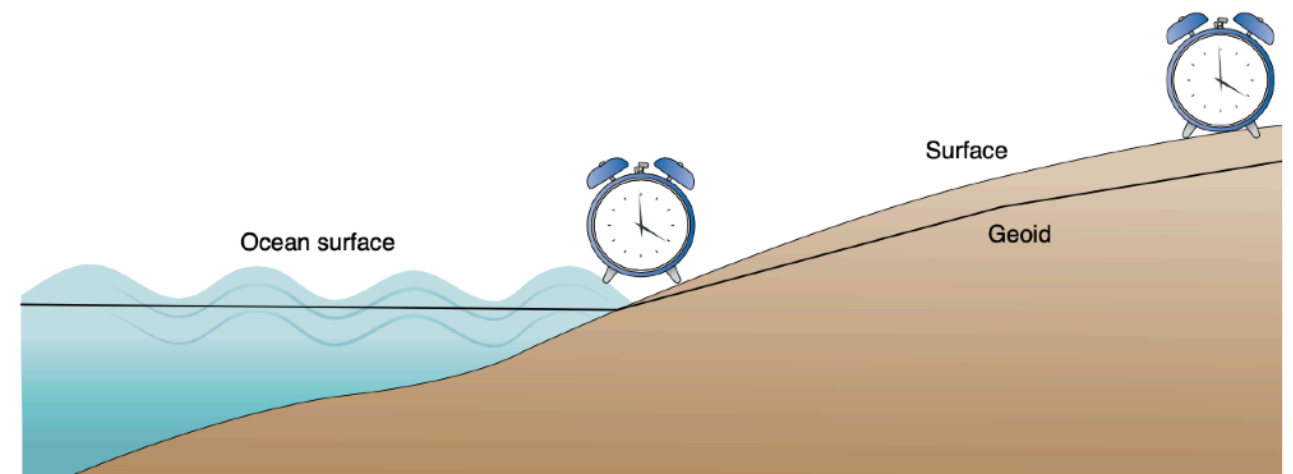


Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks. The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ.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

アインシュタインはどこまで正しい？ 検証が進む相対性理論

1. ニュートンの力学 (1687年)
2. 2つの相対性理論 (1905年, 1915年)
3. ブラックホールの観測
4. 重力波の検出
5. 時計を使った相対性理論の検証

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...

