

宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論**
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

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

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>



図 1.9 2011年3月19日のスーパームーンと、2010年12月20日の比較。



1月21日の満月 山本誠氏撮影

2月20日の満月は、今年最大の大きさに見える

明け方、金星と木星が並んでいます。

真貝 撮影



金星と木星が接近

2019年1月23日 日の出1時間前(東京:5時47分)

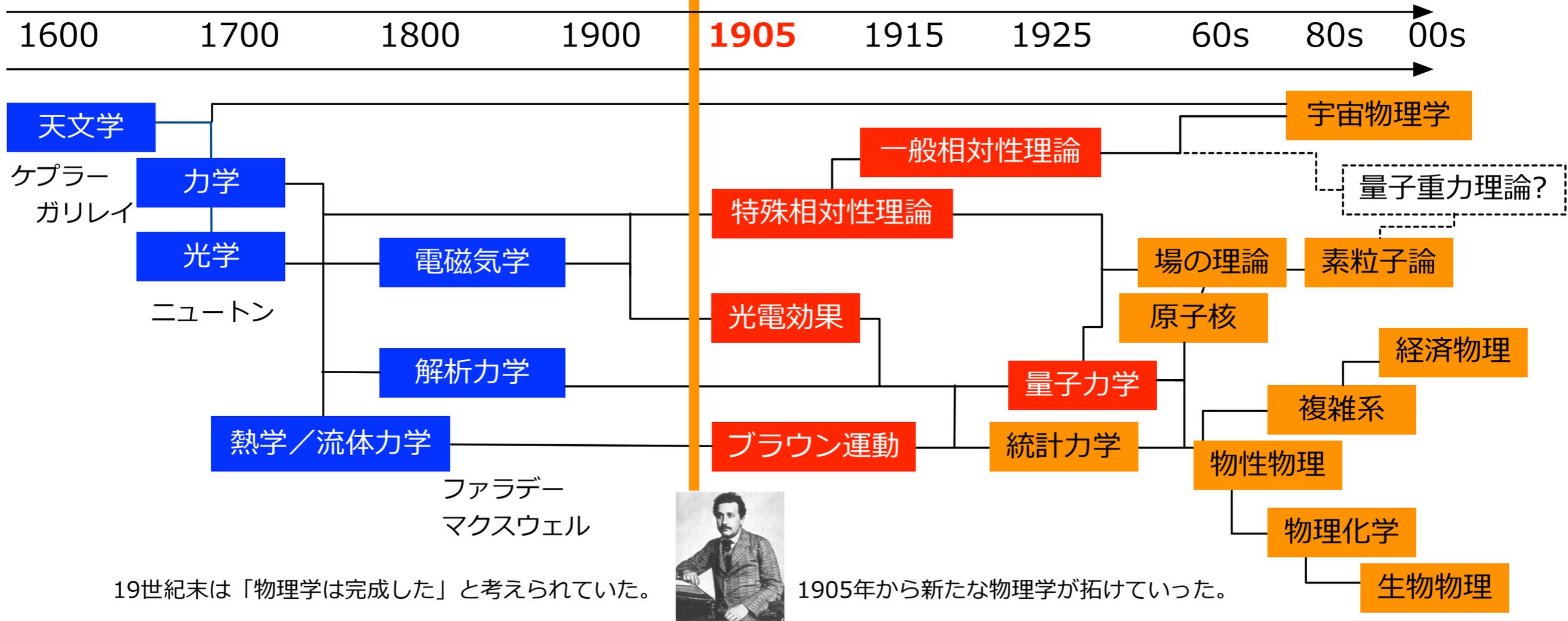


山本誠氏撮影

1905年 近代物理学から 現代物理学へ

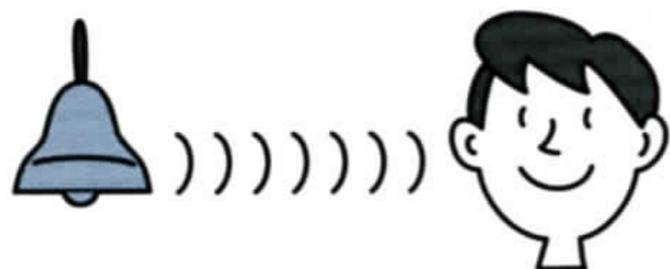
近代物理学の進展

現代物理学の進展

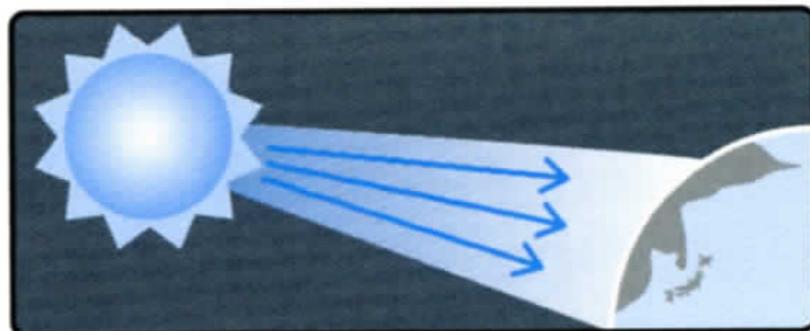


発端は電磁気学で生じた2つの疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの(媒質)は何か?



音波は空気中の分子の振動が伝える。

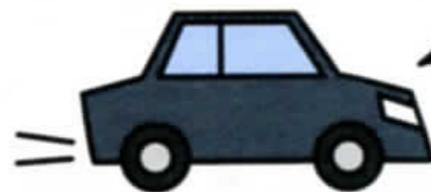


電磁波(光)は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える?

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか?



時速140km



時速120km

車中の人からはパトカーの速度は時速20kmに見える。
(速度は相対的なもの)

光は真空でも伝わる

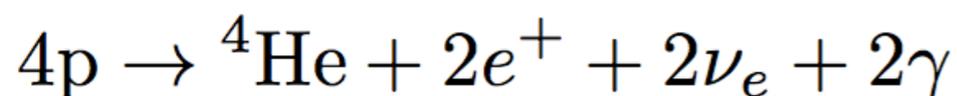
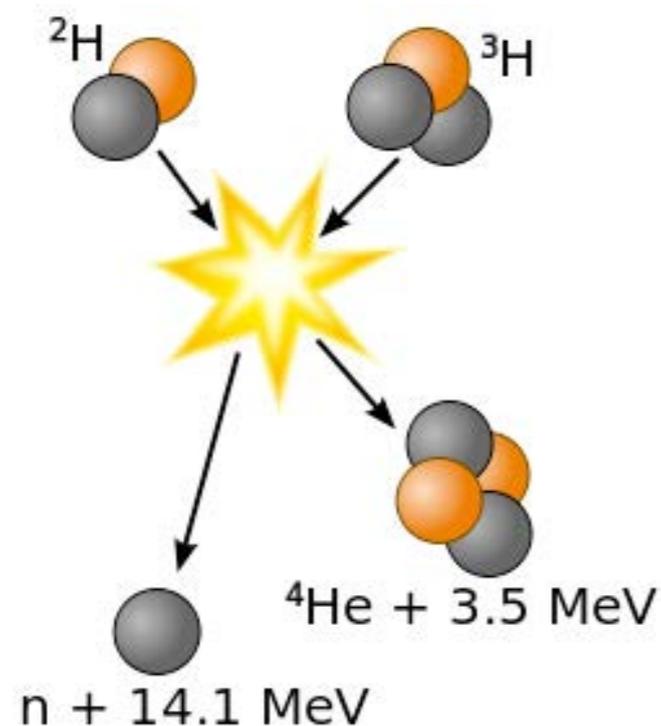


光は誰から見ても同じ速さと考えよう

時間の進み方は観測者によって異なる

$$E = mc^2$$

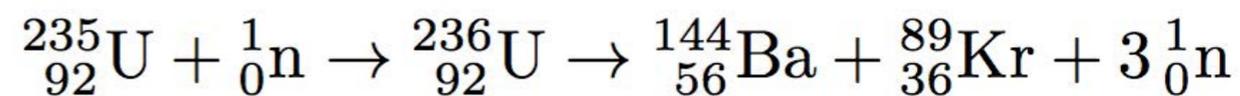
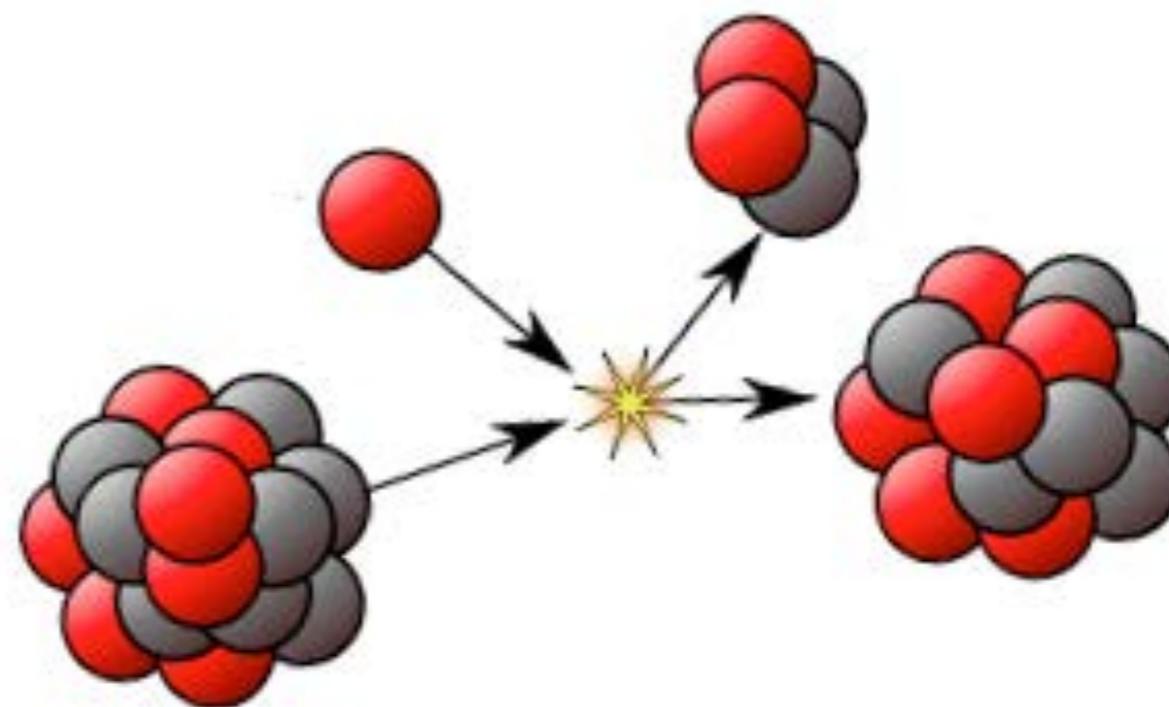
核融合反応 と 核分裂反応



恒星が燃える要因

水素爆弾

**合体した方が安定
(エネルギー放出)**



原子爆弾

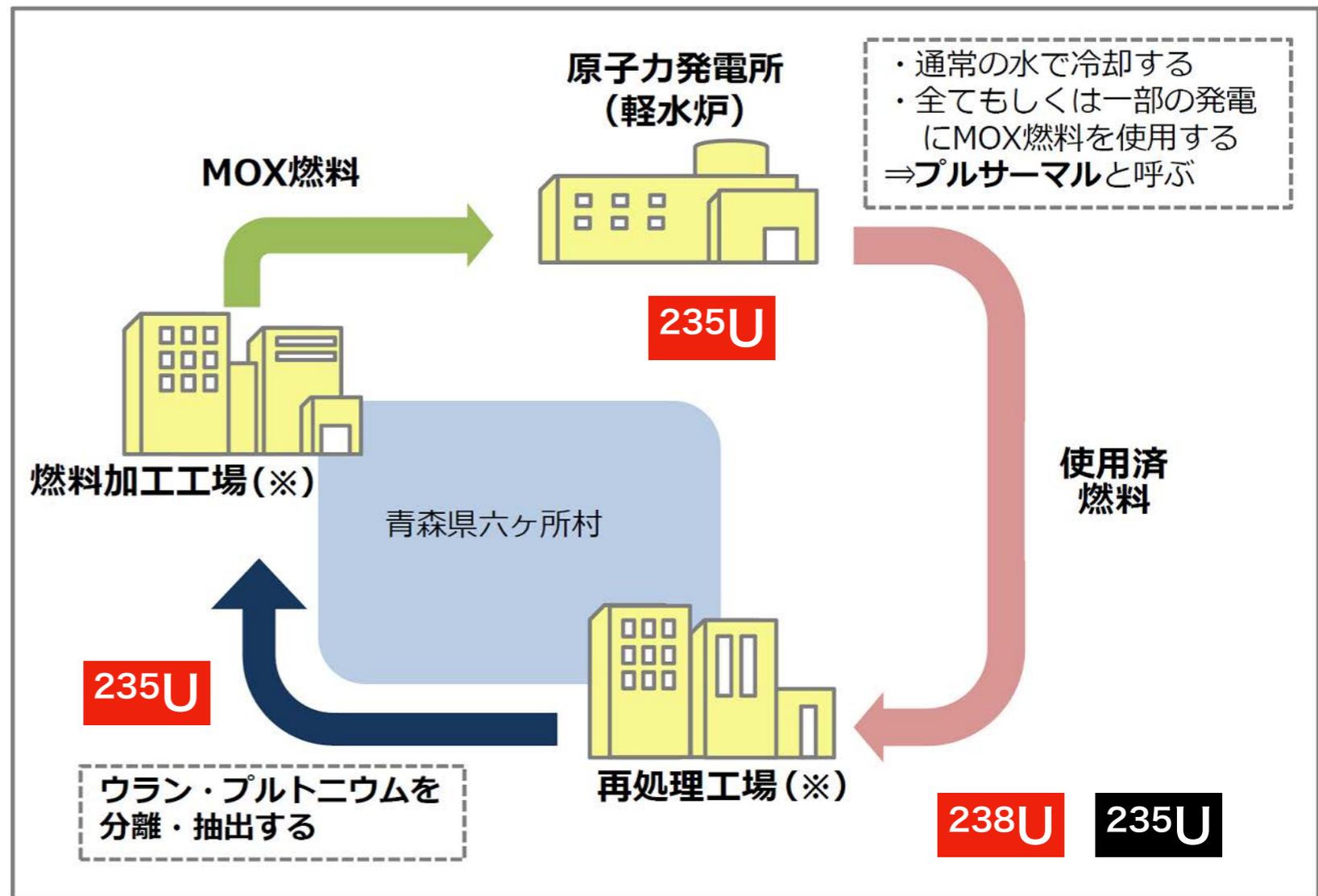
原子力発電

**分裂した方が安定
(エネルギー放出)**

もんじゅ

福井県敦賀市にある高速増殖炉。

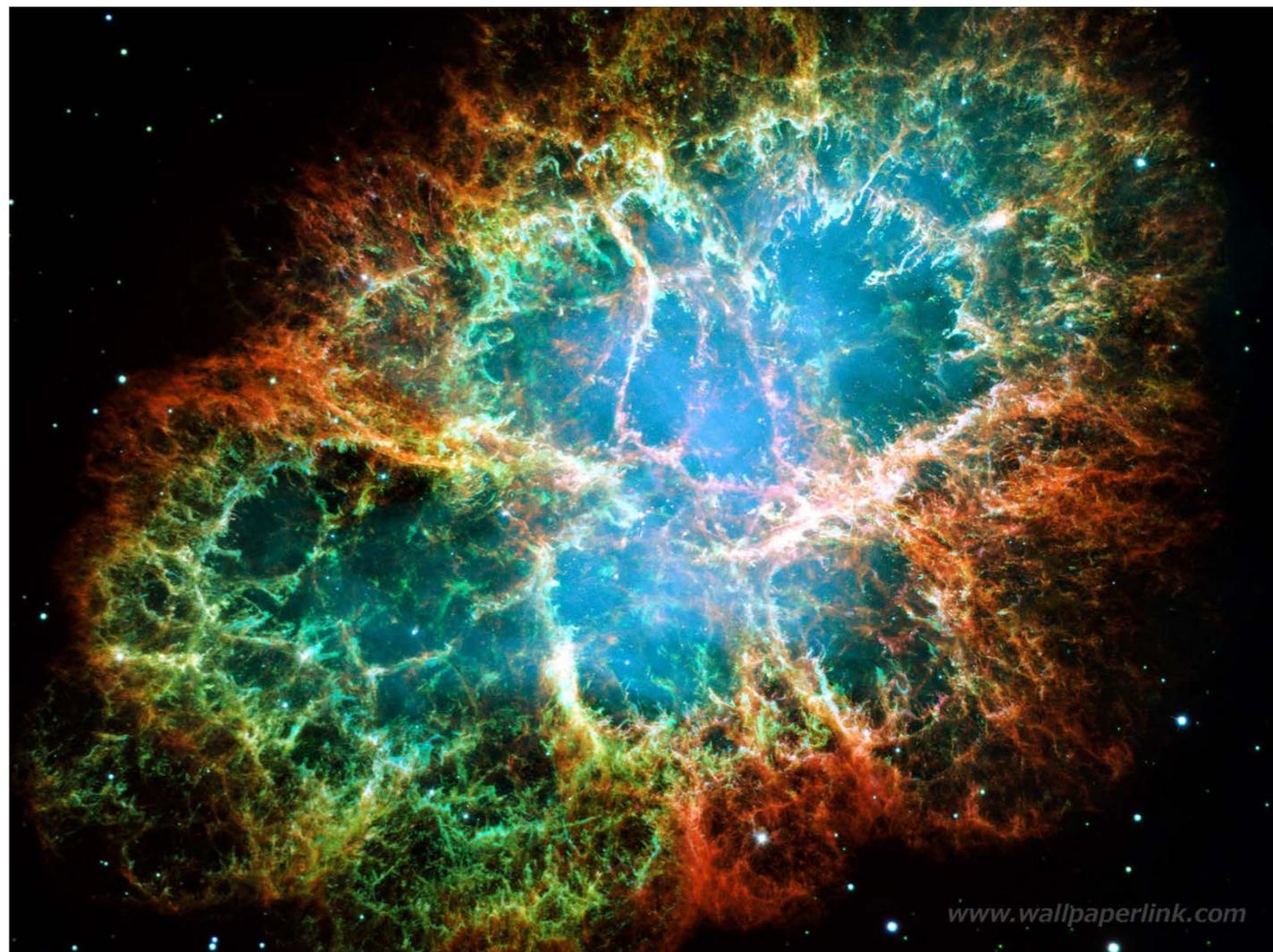
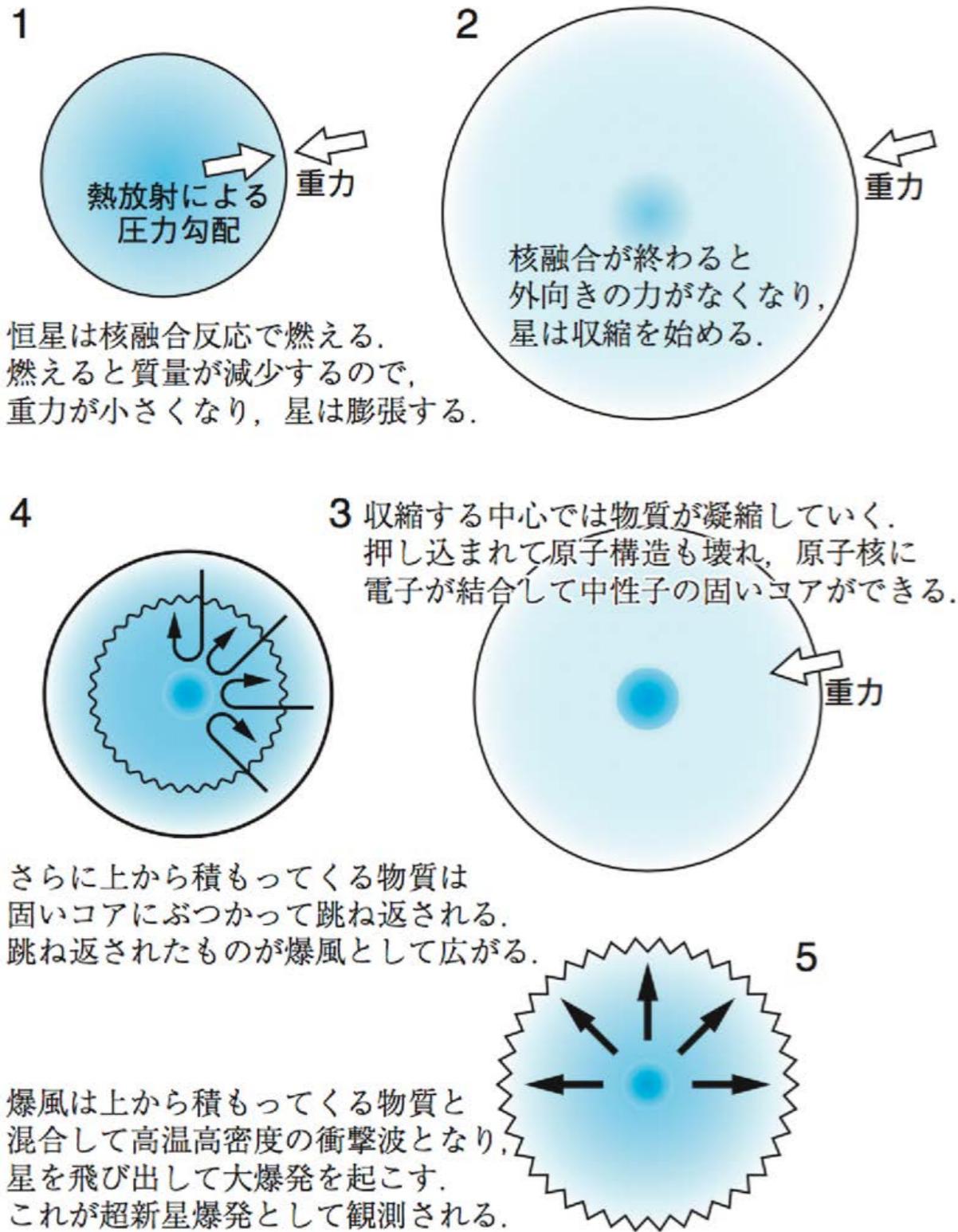
日本のめざす「核燃料サイクル」を実現するため、研究用として建設され、92年に運用開始したが、冷却用ナトリウム漏れ事故等のトラブルにより、ほとんどの期間は運転停止状態で、2016年12月に廃炉が正式決定。 >> 実証炉から実用炉へ



直接処分だと廃棄物保存は10万年，軽水炉サイクルができれば8000年

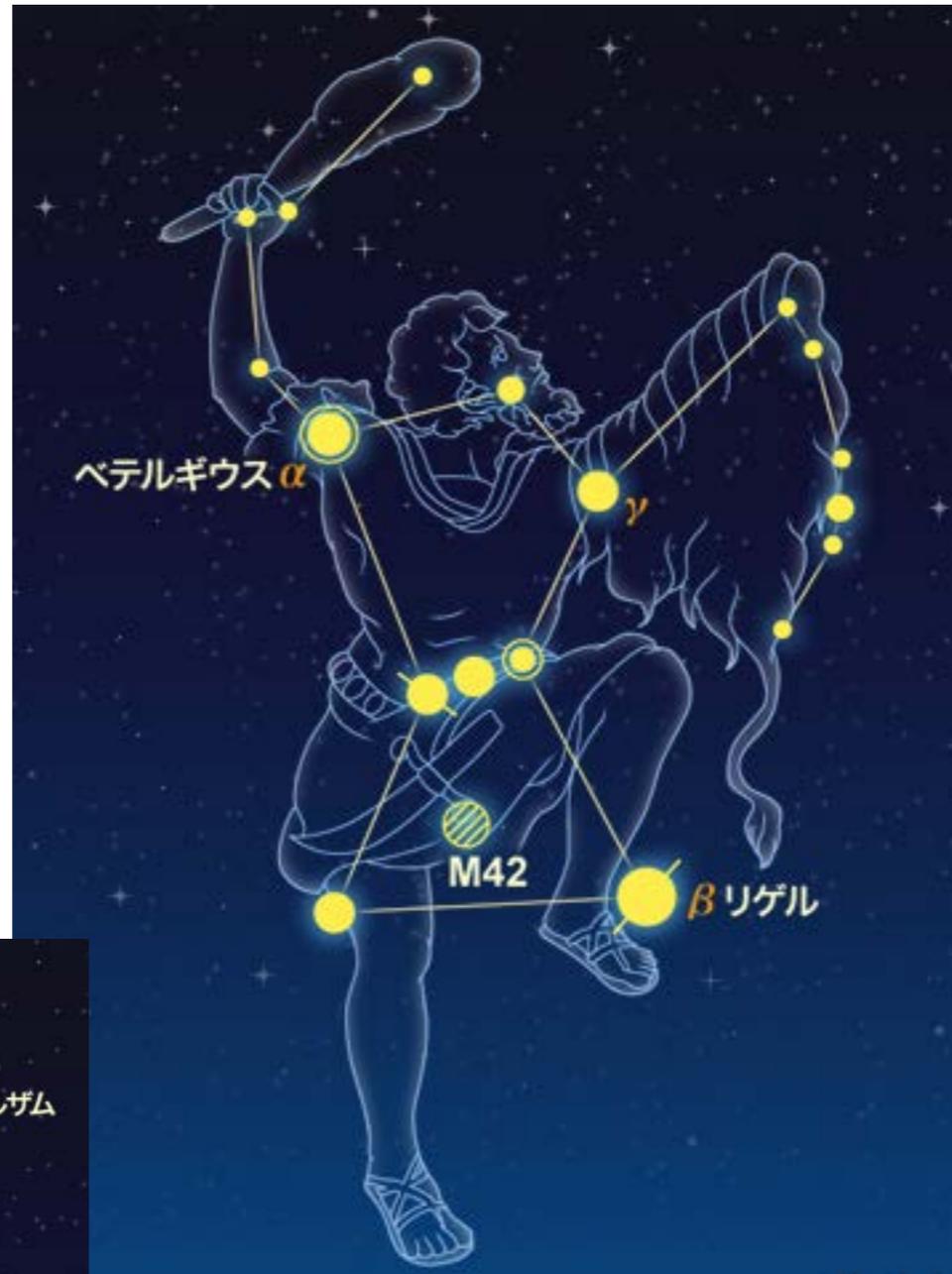
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/kakucycle.html>

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/monju.html>



かに星雲 (Crab Nebula, M1, NGC1952) SN1054
 中心にある星は、パルサー (中性子星) で、1969年発見。
 直径は約10km. 光度は16等級. 1秒間に30回という高速回転をしており、
 33msの周期で電波やX線を出し、また可視光線で星雲全体を照らしている。

図 3.23: 超新星爆発のしくみ.



Betelgeuse

ベテルギウス

640光年先

Astrometry

Radial velocity (R_v)	$+21.91^{[8]}$ km/s
Proper motion (μ)	RA: $24.95 \pm 0.08^{[9]}$ mas/yr Dec.: $9.56 \pm 0.15^{[9]}$ mas/yr
Parallax (π)	$5.07 \pm 1.10^{[9]}$ mas
Distance	$643 \pm 146^{[9]}$ ly ($197 \pm 45^{[9]}$ pc)

Details

Mass	$11.6^{+5.0}_{-3.9}^{[10]}$ M_{\odot}
Radius	$887 \pm 203^{[11]}$ R_{\odot}
Luminosity	90 000 – $150\,000^{[12]}$ L_{\odot}
Surface gravity ($\log g$)	$-0.5^{[13]}$ cgs
Temperature	$3590^{[10]}$ K
Metallicity [Fe/H]	$+0.05^{[14]}$ dex
Rotational velocity ($v \sin i$)	$5^{[15]}$ km/s
Age	8.0 – $8.5^{[11]}$ Myr

特殊相対性理論は正しいか？

- **光速度一定**
疑う余地なし
- **時間の遅れ**
宇宙線による素粒子の寿命
原子時計を用いた飛行機実験
GPS衛星からの電波
- **$E=mc^2$**
原子核実験，原子力発電に応用
- **素粒子理論**は特殊相対性理論をベースにして構築されており，この前提が崩れればたいへんなことになる。

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

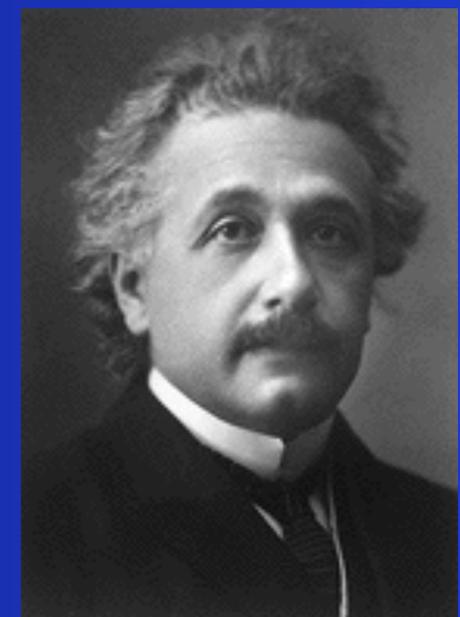
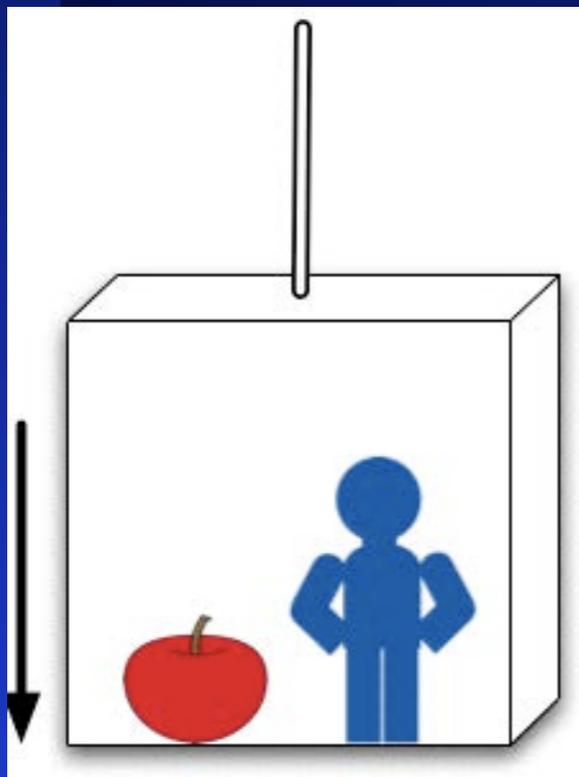
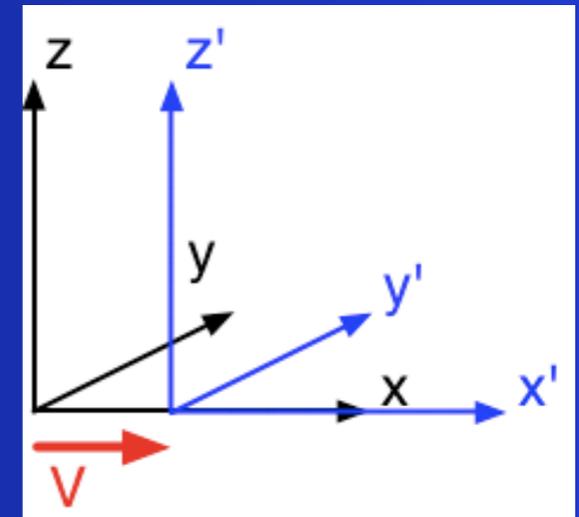
$$F = ma$$

一般相対性理論【等価原理】

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった。

★ 加速度とは何か？

エレベータの思考実験



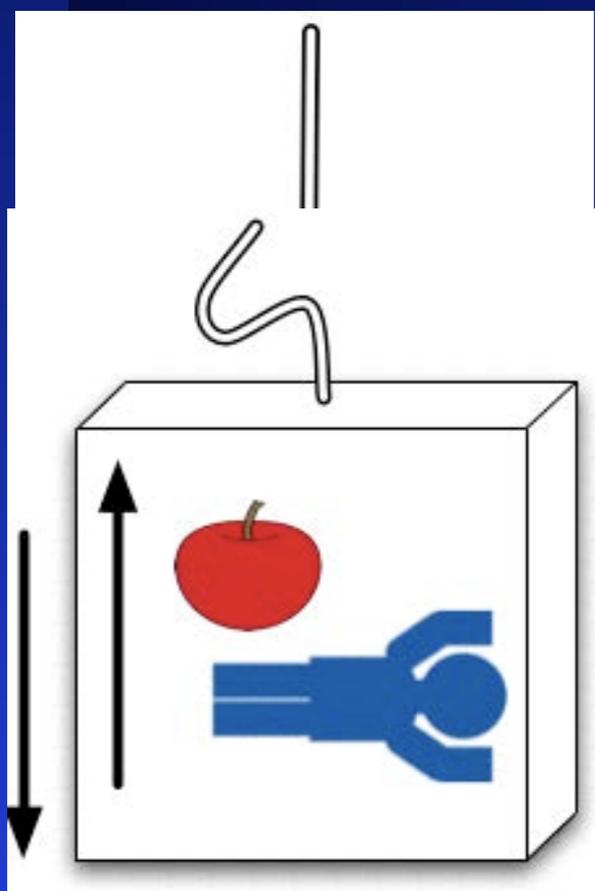
一般相対性理論【等価原理】

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった。

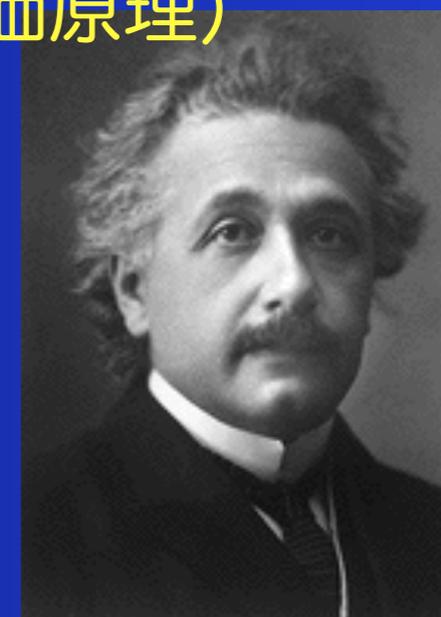
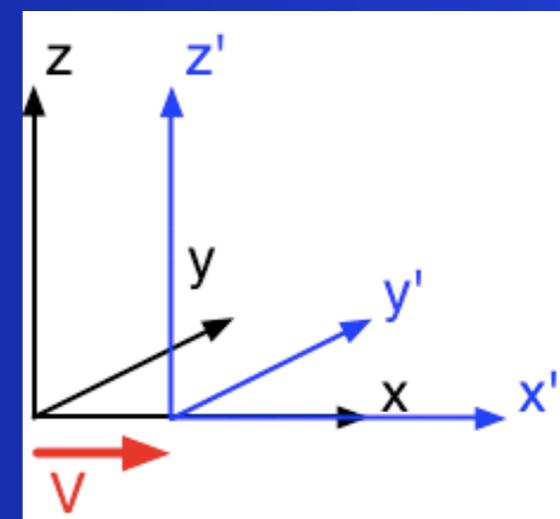
★ 加速度とは何か？

エレベータの思考実験

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

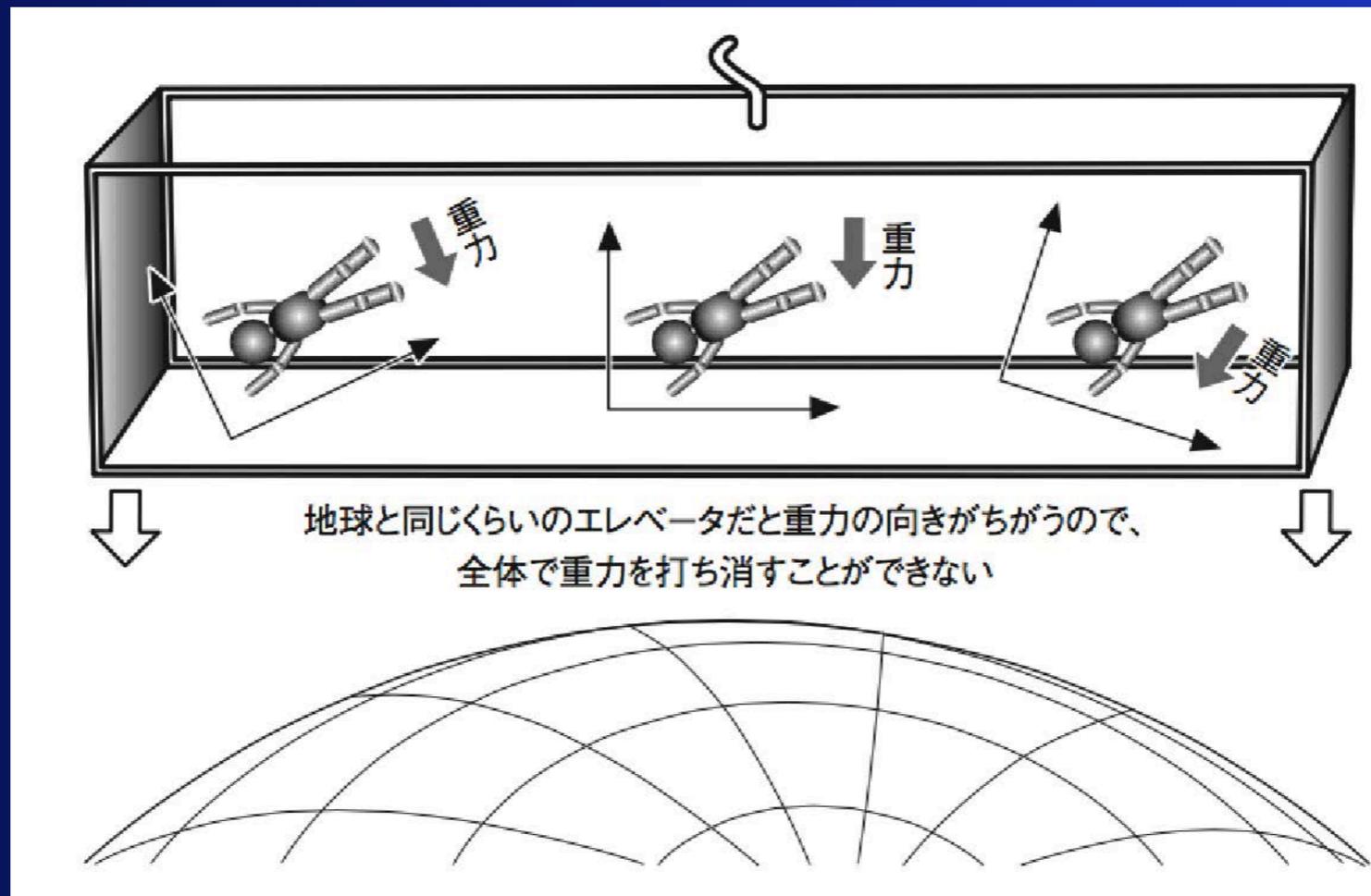


「生涯で最もすばらしいアイデア」



一般相対性理論【重力の正体】

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



= 重力は、大局的には消去できない。

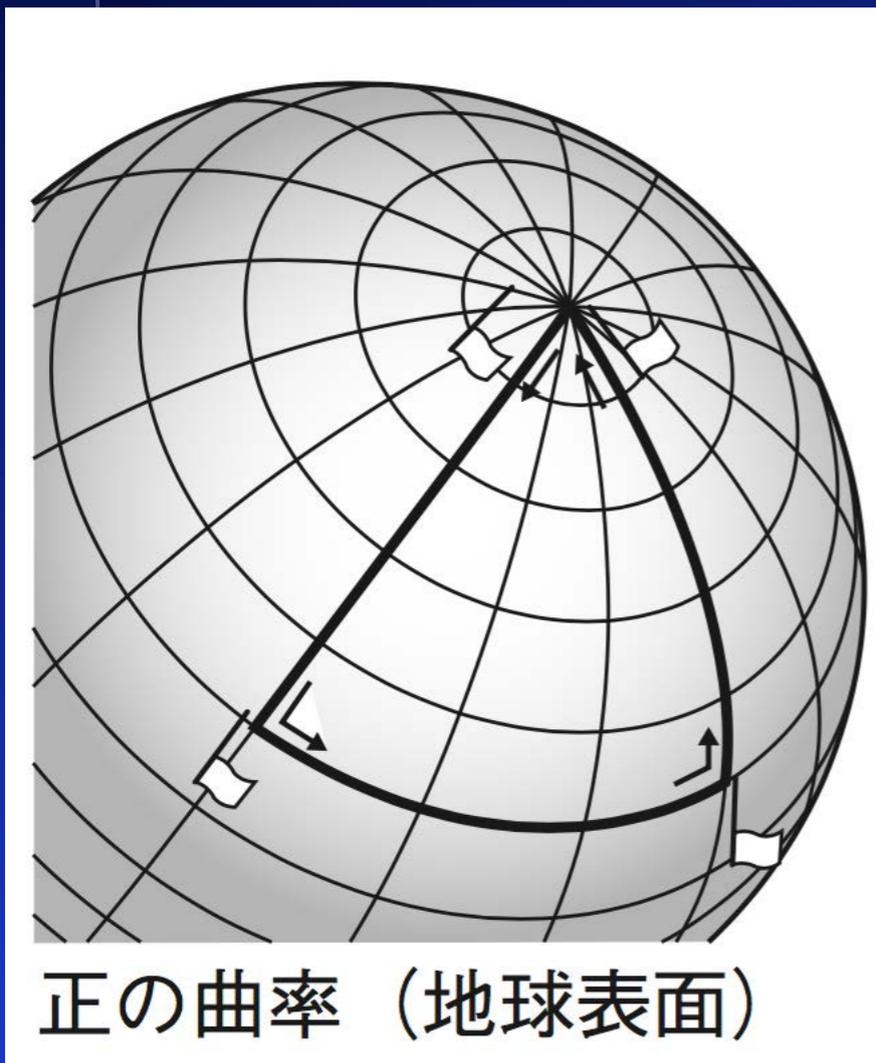
= 重力の正体は、時空のもつ曲がり具合である。

曲がった時空の幾何学 = 「一般相対性理論」

一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.



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

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

平らな時空(flat spacetime)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$

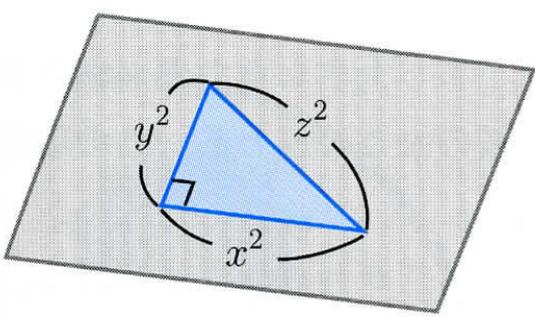
一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.

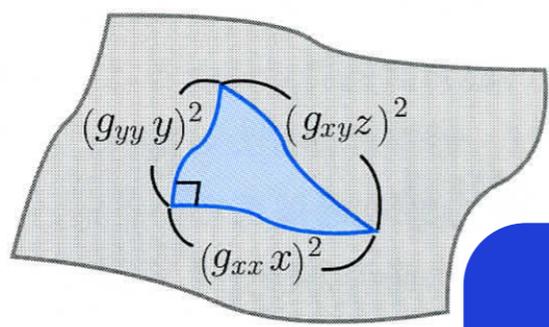
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

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。



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

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。

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

$$\begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

物理学者は、リーマン幾何学に深入りしないほうがいいよ。



Marcel Grossmann

(time)では,

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

重力場の方程式の導出は、紆余曲折し、アインシュタイン自身も最終的な式に達したのは、直前だった。1915年11月は1週間おきに学士院で途中経過を発表し、その翌週には報告として論文を書き、自宅にこもりきりで計算を続けていた。というのも、10月になって、それまでの考えが間違っていたことに気がついたからだ。

(中略)

1915年**11月4日の論文**では、座標系に制限をおいた上で、重力場の方程式を得た。

翌週**11日の論文**ではこの座標条件を出発点とすることを主張する

(2週間後の論文では撤回する)。次週**18日の論文**では、水星の近日点移動の値が(以前得た値の倍の)100年間に43秒角になるという正しい値を得た(当時観測から知られていた値は45秒角±5秒角だった)。この値を得たときには「心臓の鼓動(palpitation)を感じた」と述懐している。また、この論文には半ページだけ使って「太陽のそばを通過する光は、重力によって、(以前得た値の倍の)1.7秒角だけ湾曲する」とも述べている。

(中略)

アインシュタインは演繹的方法で得られた重力場の方程式を**25日に投稿して受理される**。アインシュタインの論文は、12月2日に出版された。



一般相対性理論【Einstein方程式】

重力場の方程式 (1915)

空間の曲がりかモノの運動を決める \Leftrightarrow モノがあると空間が曲がる

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

アインシュタイン曲率テンソル

<空間の歪み>

$$\begin{aligned} \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} &\equiv \frac{1}{2}g^{\alpha\beta}(\partial_{\nu}g_{\beta\mu} + \partial_{\mu}g_{\beta\nu} - \partial_{\beta}g_{\mu\nu}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_{\alpha}\Gamma_{\nu\beta}^{\mu} - \partial_{\beta}\Gamma_{\nu\alpha}^{\mu} + \Gamma_{\sigma\alpha}^{\mu}\Gamma_{\nu\beta}^{\sigma} - \Gamma_{\sigma\beta}^{\mu}\Gamma_{\nu\alpha}^{\sigma} \\ R_{ab} &\equiv R^{\mu}_{a\mu b} \equiv \partial_{\mu}\Gamma_{ab}^{\mu} - \partial_b\Gamma_{a\mu}^{\mu} + \Gamma_{\nu\mu}^{\mu}\Gamma_{ab}^{\nu} - \Gamma_{\nu b}^{\mu}\Gamma_{a\mu}^{\nu} \\ R &= g^{ab}R_{ab} \end{aligned}$$

エネルギー運動量テンソル

<モノの分布>

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$

一般相対性理論【Einstein方程式】

重力場の方程式 (1915)

空間の曲がりかたがモノの運動を決める \Leftrightarrow モノがあると空間が曲がる

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

- μ, ν と添字は 4 次元の座標の成分 (t, x, y, z) を表していて、この式全体は具体的には 10 本の微分方程式である。
- (3.21) 式の右辺は、エネルギー運動量テンソルと呼ばれ、真空ならば $T_{\mu\nu} = 0$ となる。
- 一般相対論は、強い重力場の物理現象を記述する。対象となるのは、コンパクトで重い天体や宇宙全体である。

一般相対性理論の予言【水星の軌道】

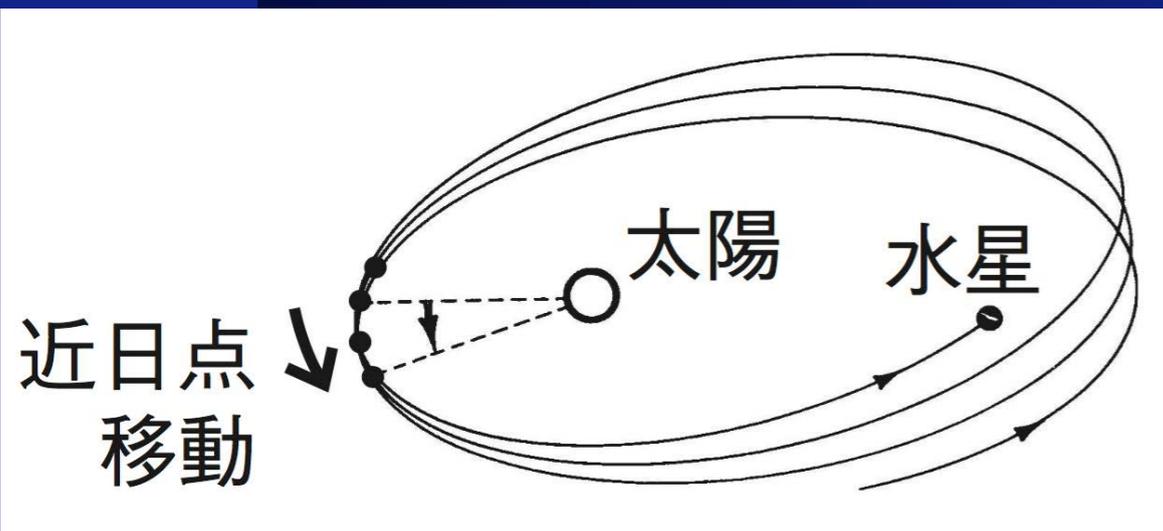
近日点移動

水星の近日点移動の問題（ルベリエ，1854）

100年で574秒ずれる。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？？？



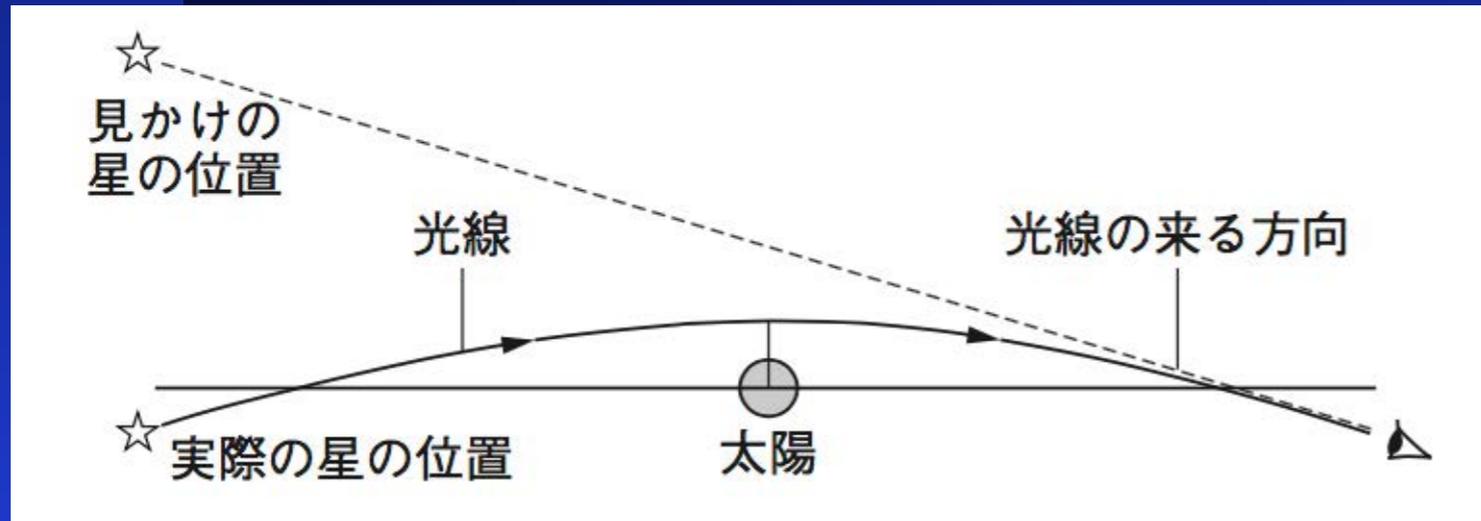
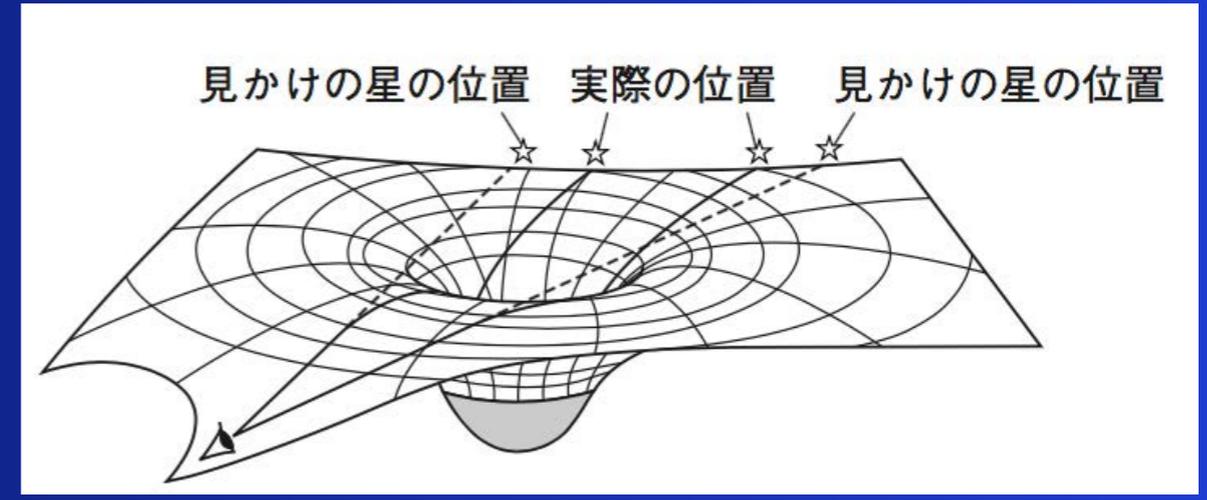
1915年，アインシュタインが，できたばかりの一般相対性理論を適用すると，「43秒の歳差運動」が出てきた。

「2-3日間，興奮のため，我を忘れてしまった」

一般相対性理論は正しい

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが、重い天体の周りでは、時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



1919年、エディントンが、皆既日食を利用して、光の曲がりを確認 (0.875秒角)

一般相対性理論は正しい

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

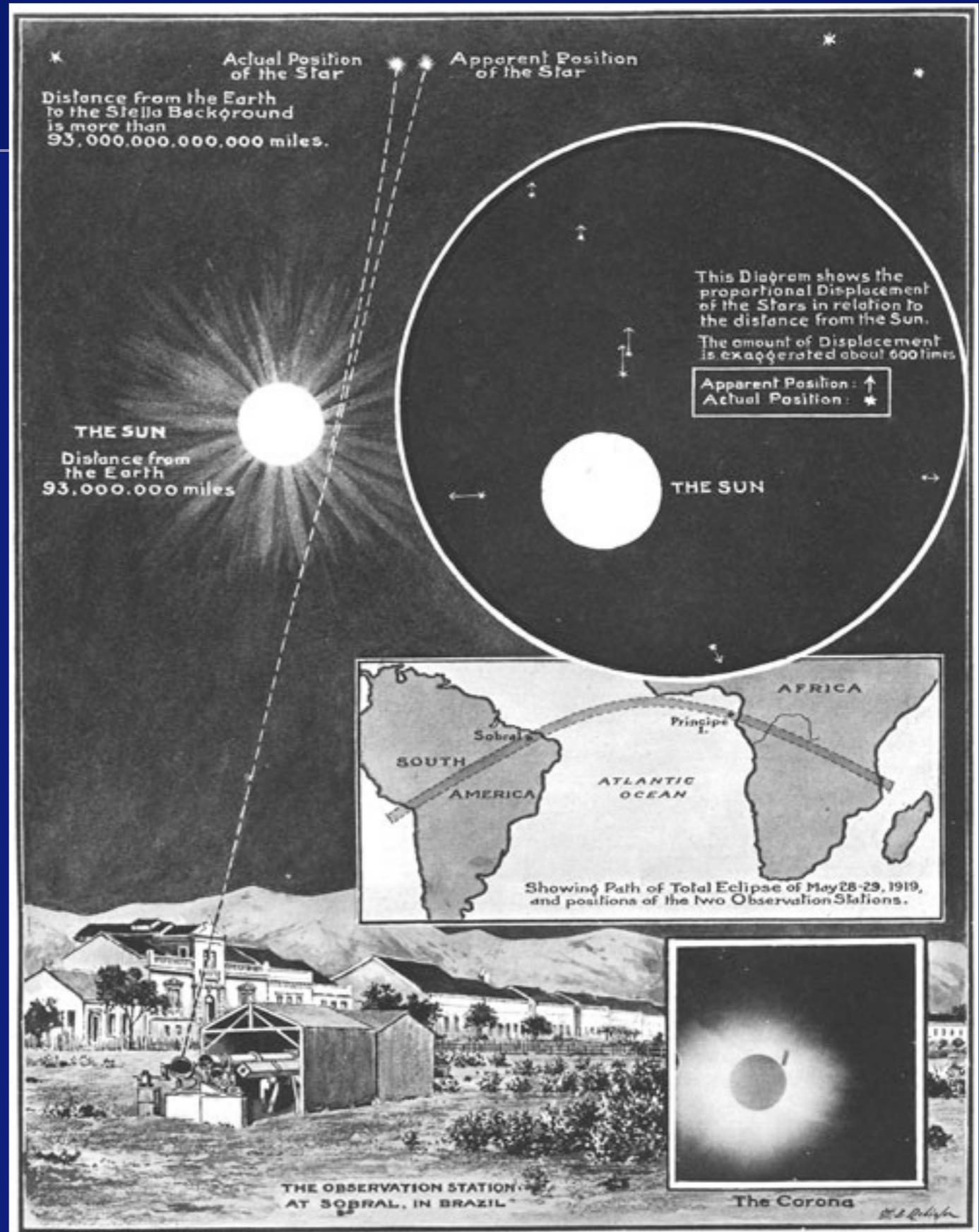
Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.

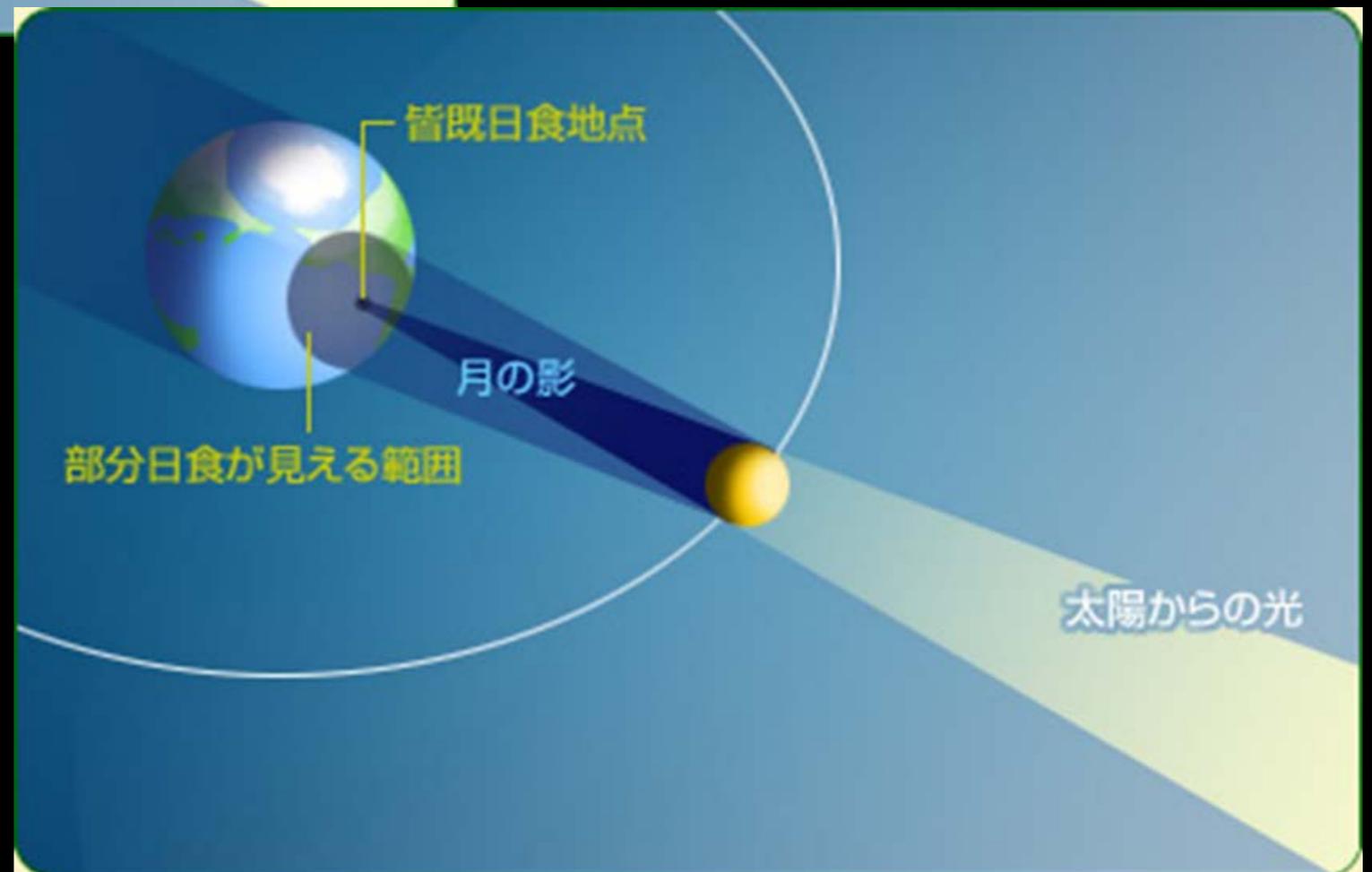
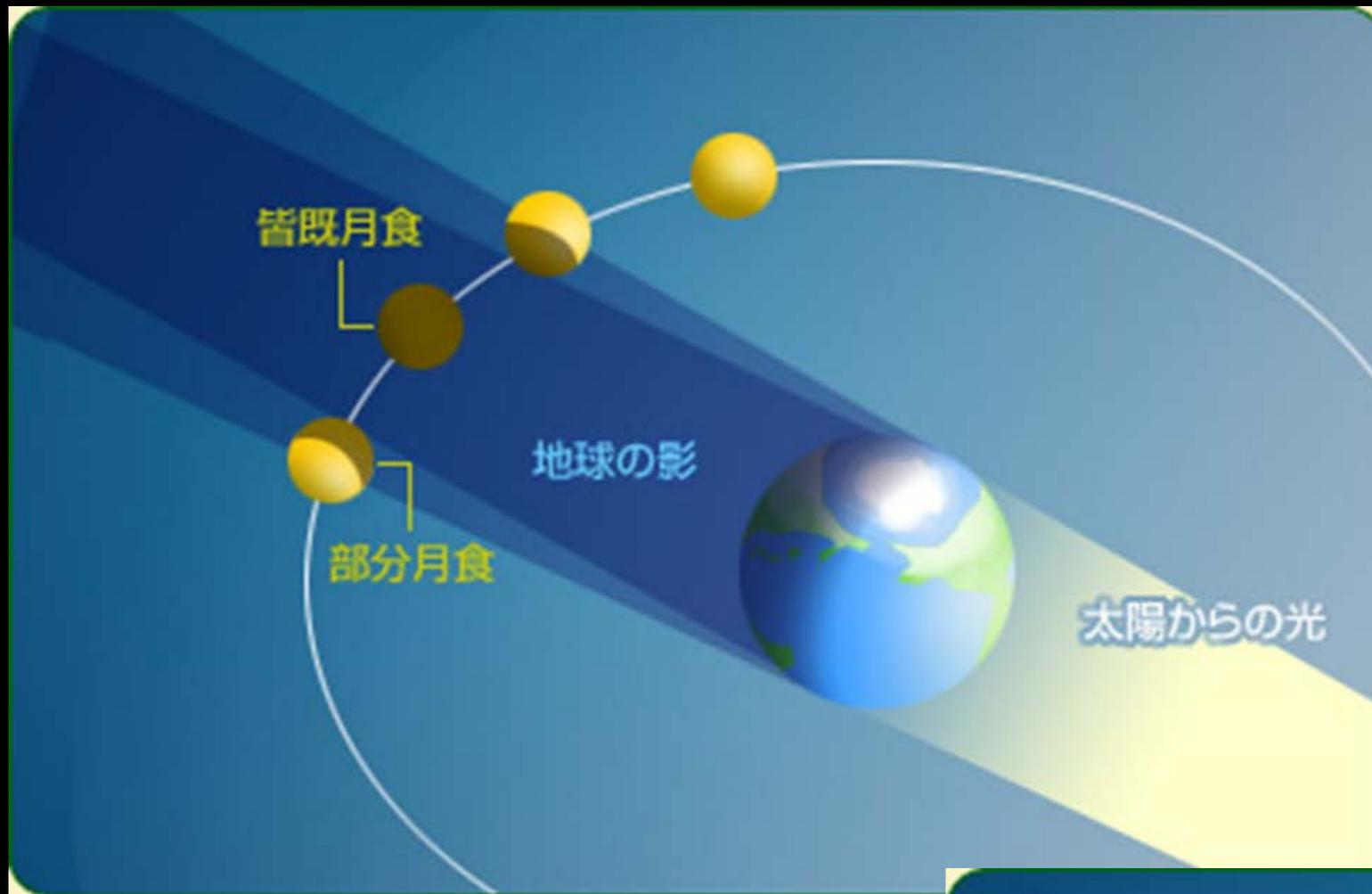




Arthur Stanley Eddington
(1882–1944)

He was an early advocate of Einstein's General Relativity, and an interesting anecdote well illustrates his humour and personal intellectual investment: Ludwig Silberstein, a physicist who thought of himself as an expert on relativity, approached Eddington at the Royal Society's (6 November) 1919 meeting where he had defended Einstein's Relativity with his Brazil-Principe Solar Eclipse calculations with some degree of scepticism and ruefully charged Arthur as one who claimed to be one of three men who actually understood the theory (Silberstein, of course, was including himself and Einstein as the other two). When Eddington refrained from replying, he insisted Arthur not be "so shy", whereupon Eddington replied, **"Oh, no! I was wondering who the third one might be!"**

月食のしくみ

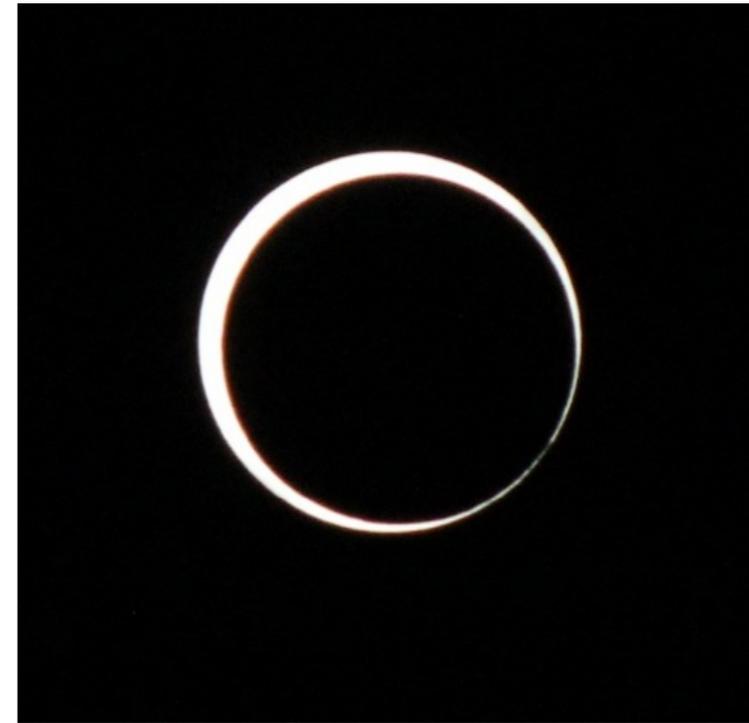


日食のしくみ

2012年5月21日 金環日食



京都府木津市 槌谷則夫氏撮影



京都府向日市 真貝撮影



2017年8月21日

皆既日食



縣 秀彦氏撮影



縣 秀彦

8月22日 · 🌐



第2接触時にベアリ・ビーズが肉眼でもよく分かる綺麗な日食でした。



縣 秀彦

8月22日 · 🌐

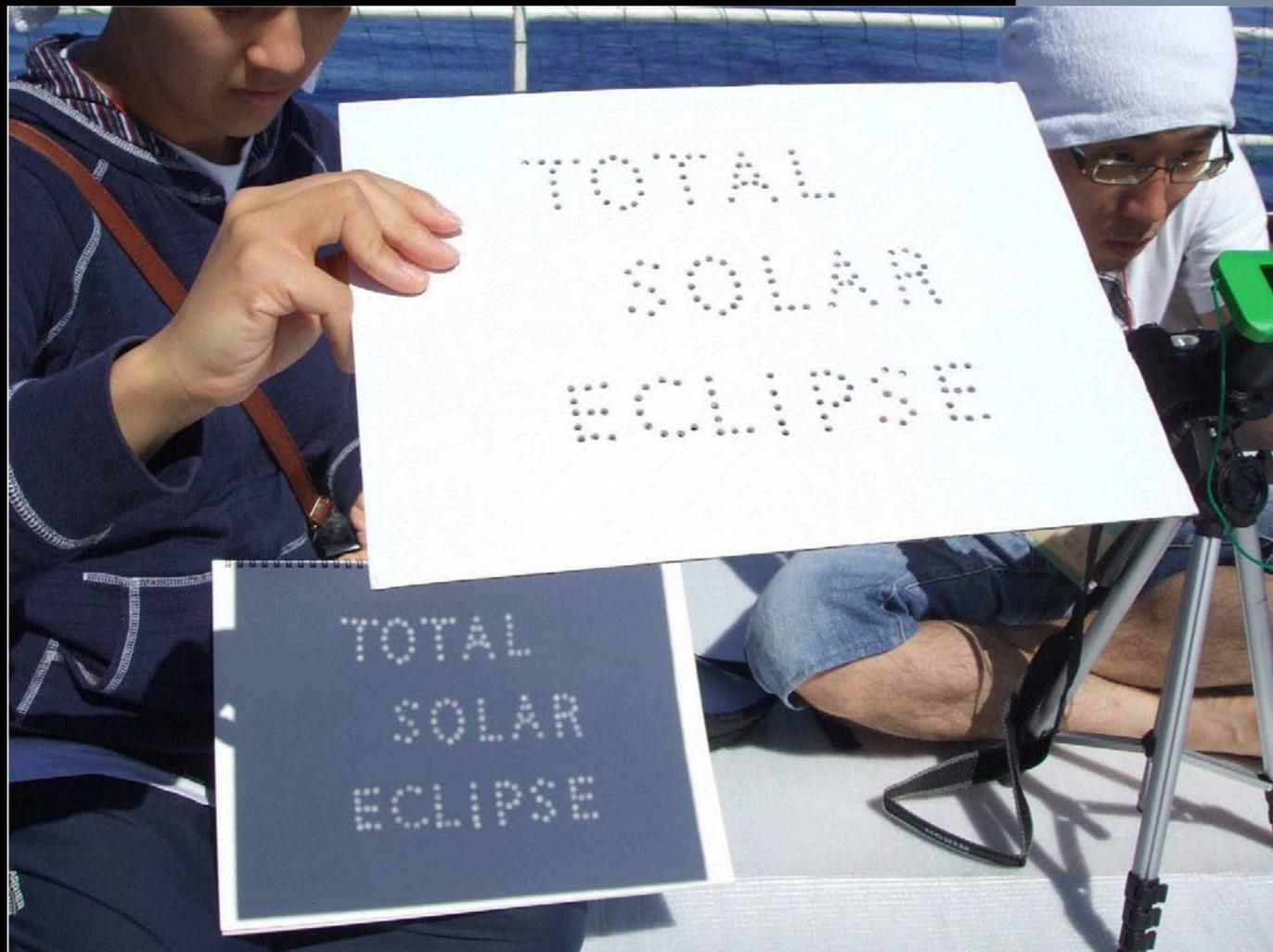
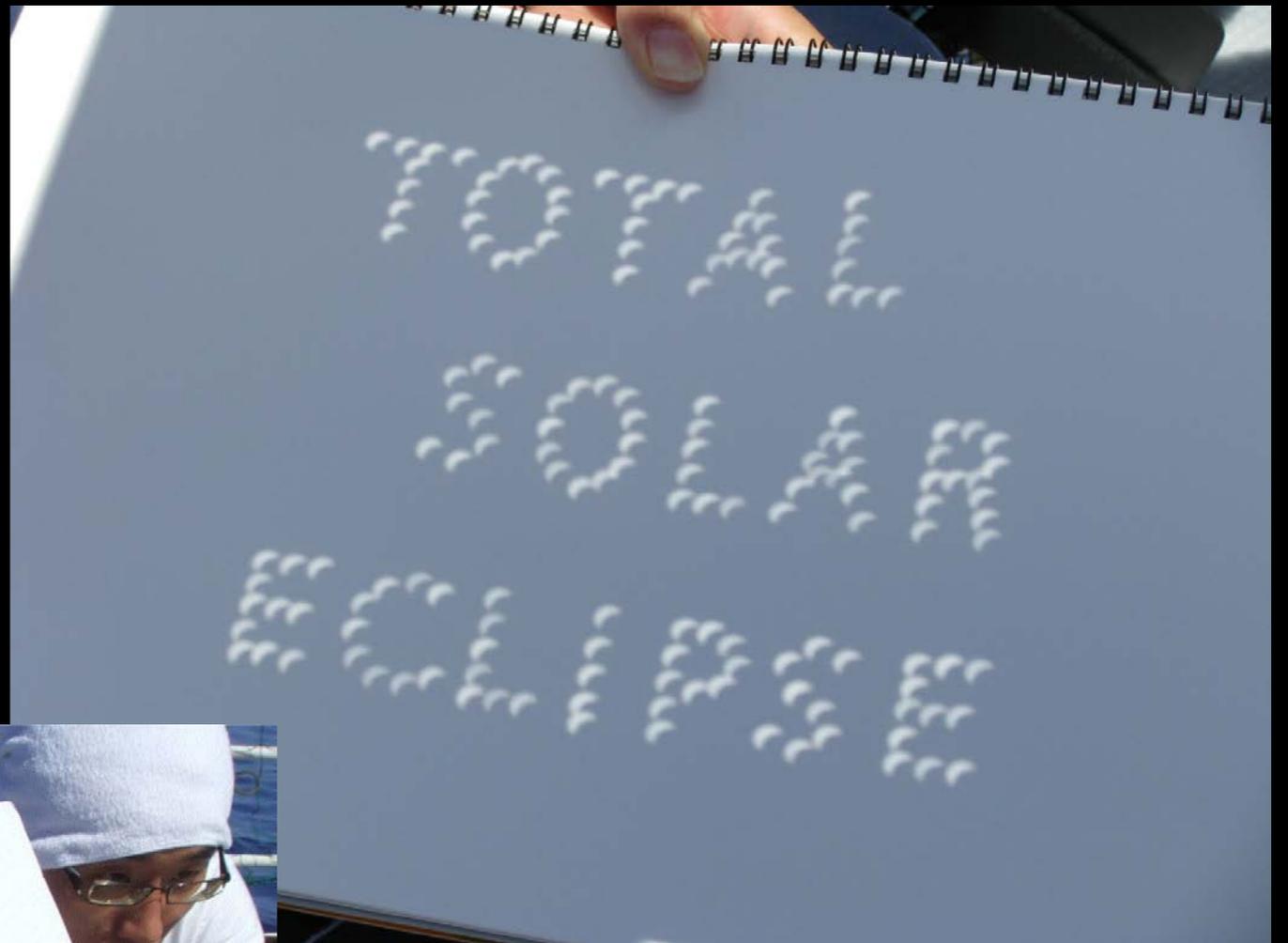


What a beautiful diamond ring !
ダイヤモンドリングも綺麗でした。

ふじ丸 皆既日食ツアー



2009年7月22日9時30分 真貝寿明撮影



2009年7月22日 10時52分 真貝寿明撮影

2009年7月22日 福江慧氏撮影



2009年7月22日 11時25分 大鐘卓哉氏撮影



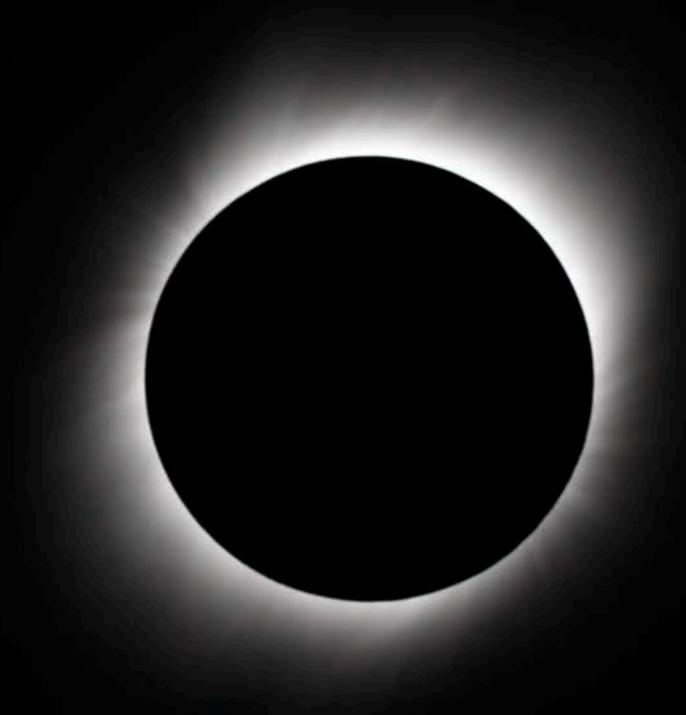
2009年7月22日11時27分 米田晃氏撮影



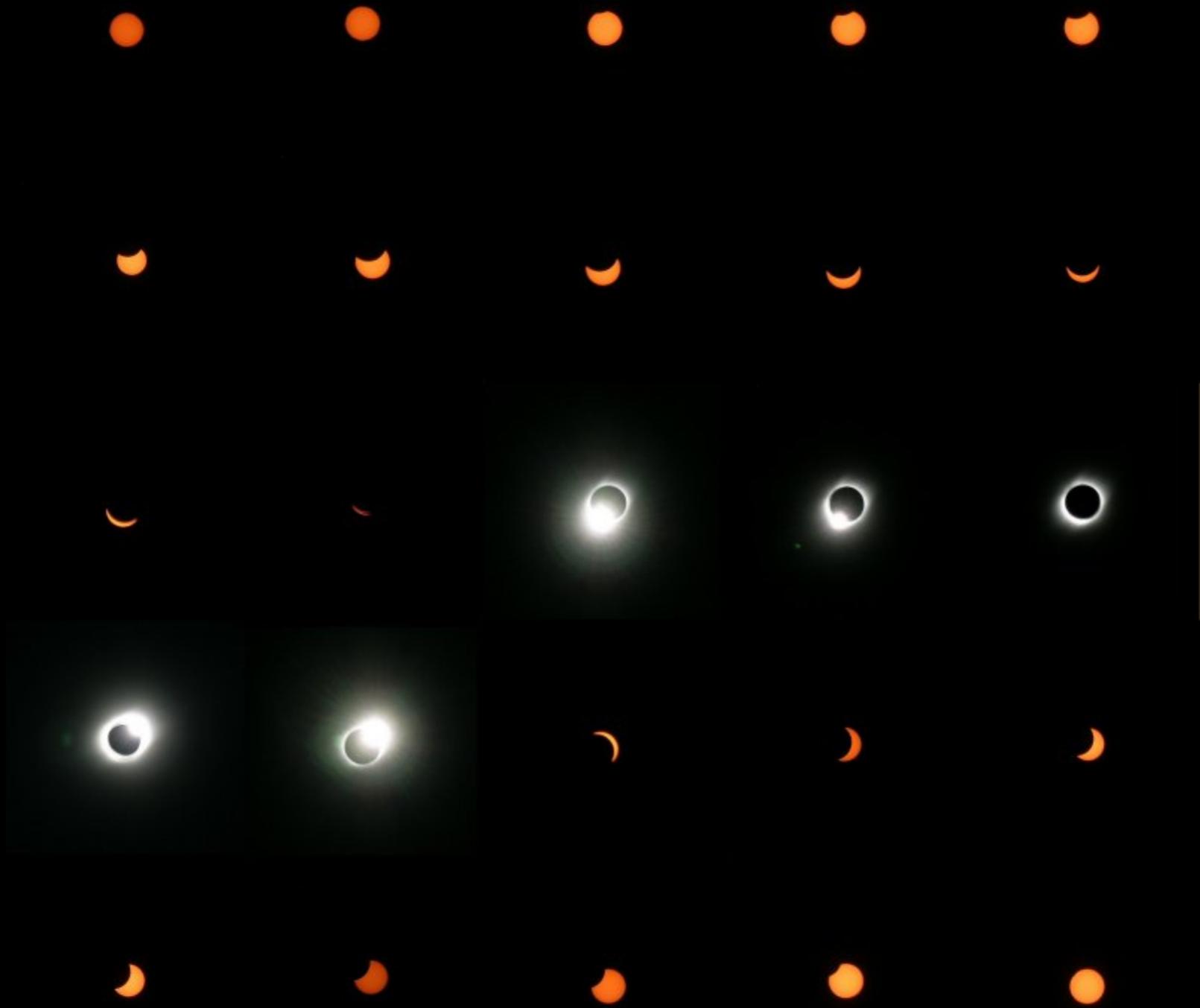
2009年7月22日11時28分 米田晃氏撮影



2009年7月22日11時?分 大西浩次氏撮影



2009年7月22日 11時33分 米田晃氏撮影



2009年7月22日 福江慧氏撮影



2009年7月22日 11時29分 真貝寿明撮影



2009/ 7/22 11:28am

2009年7月22日11時28分 大鐘卓哉氏撮影



22 11:30AM

2009年7月22日 福江純氏撮影

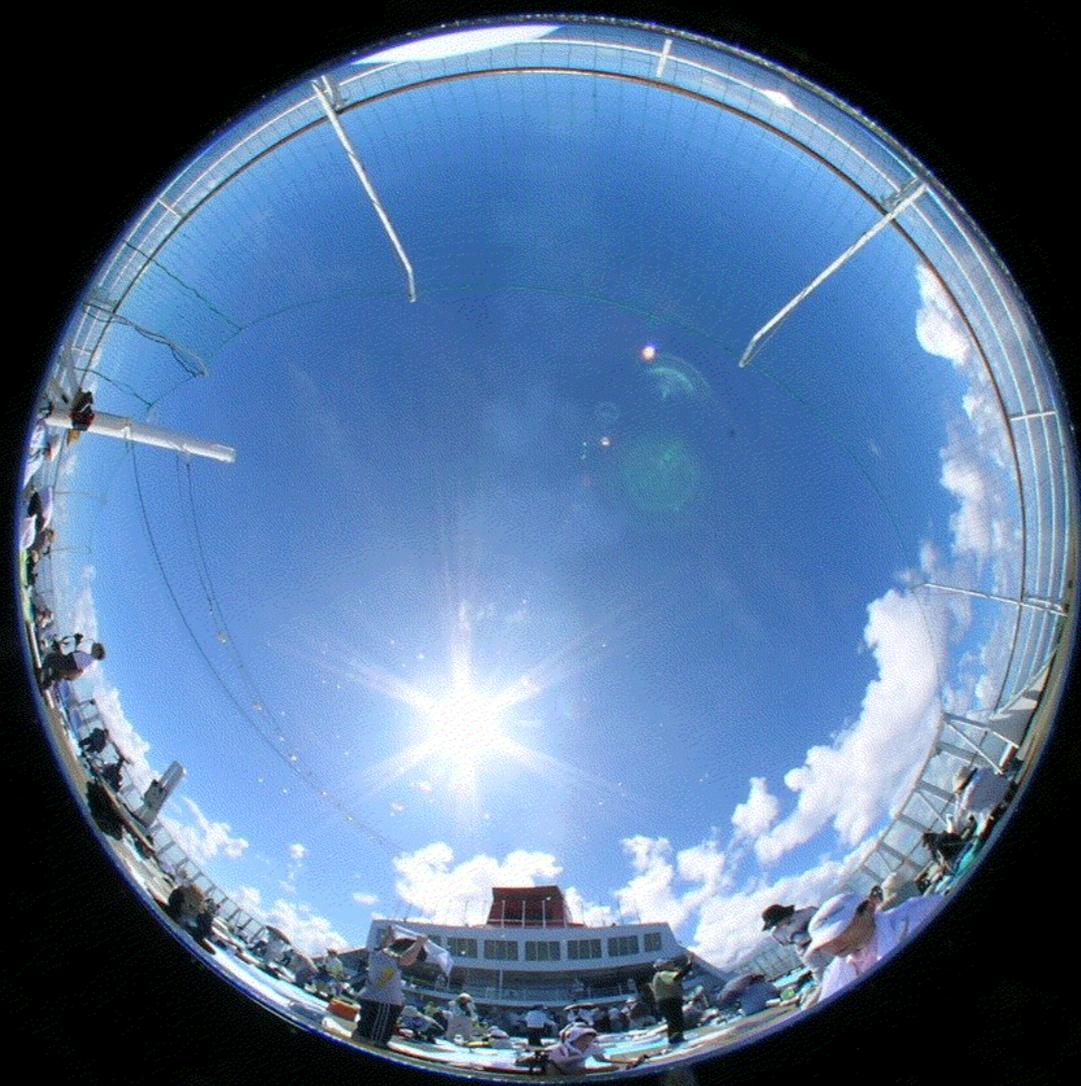


2009年7月22日 11時30分 米田晃氏撮影



2009年7月22日 福江慧氏撮影



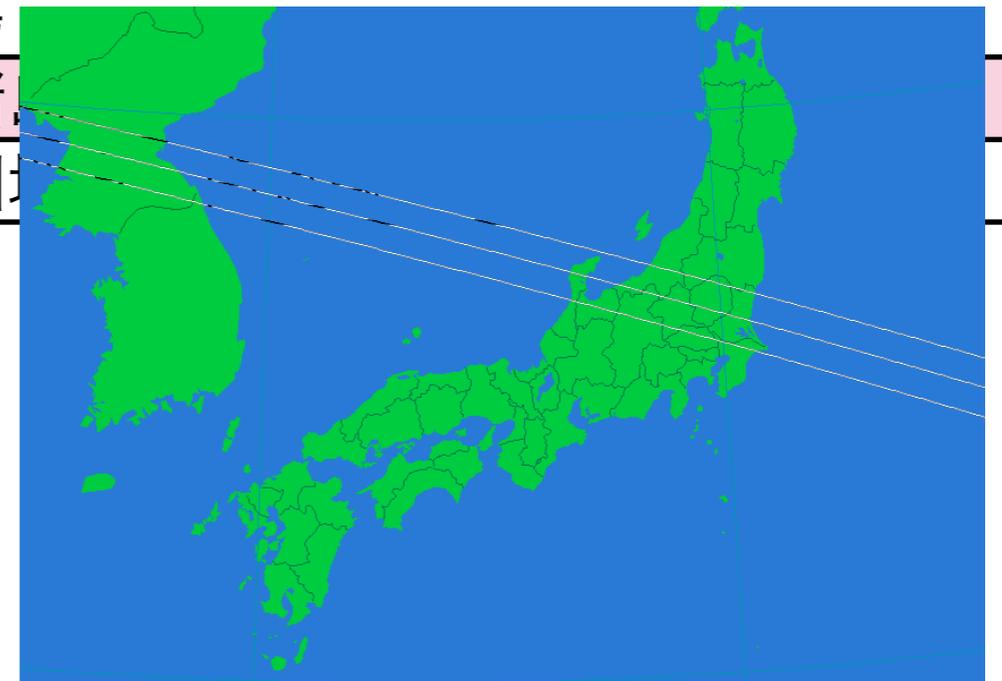


2009年7月22日 福江慧氏撮影

日本でみられる皆既日食／金環日食

年 月 日	種 類	見 え る 場 所
2009年7月22日	皆既日食	奄美大島・屋久島・種子島・トカラ列島・硫黄島
2012年5月21日	金環日食	南九州・南四国・南近畿・東海地方・関東地方
2030年6月1日	金環日食	北海道
2035年9月2日	皆既日食	能登・富山・長野・前橋・宇都宮・水戸
2041年10月25日	金環日食	北近畿・中部地方・伊豆諸島
2042年4月20日	皆既日食	鳥島（伊豆小笠原諸島）
2063年8月24日	皆既日食	青森県北部・北海道南部
2070年4月11日	皆既日食	須美寿島（伊豆小笠原諸島）
2074年1月27日	金環日食	鹿児島県南部・屋久島・種子島
2085年6月22日	金環日食	沖縄島・大東島
2089年10月4日	皆既日食	宮古島・尖閣諸島
2095年11月27日	金環日食	中国地方・四国地方

2035年9月2日
 関東一北陸皆既日食
 最大2分54秒

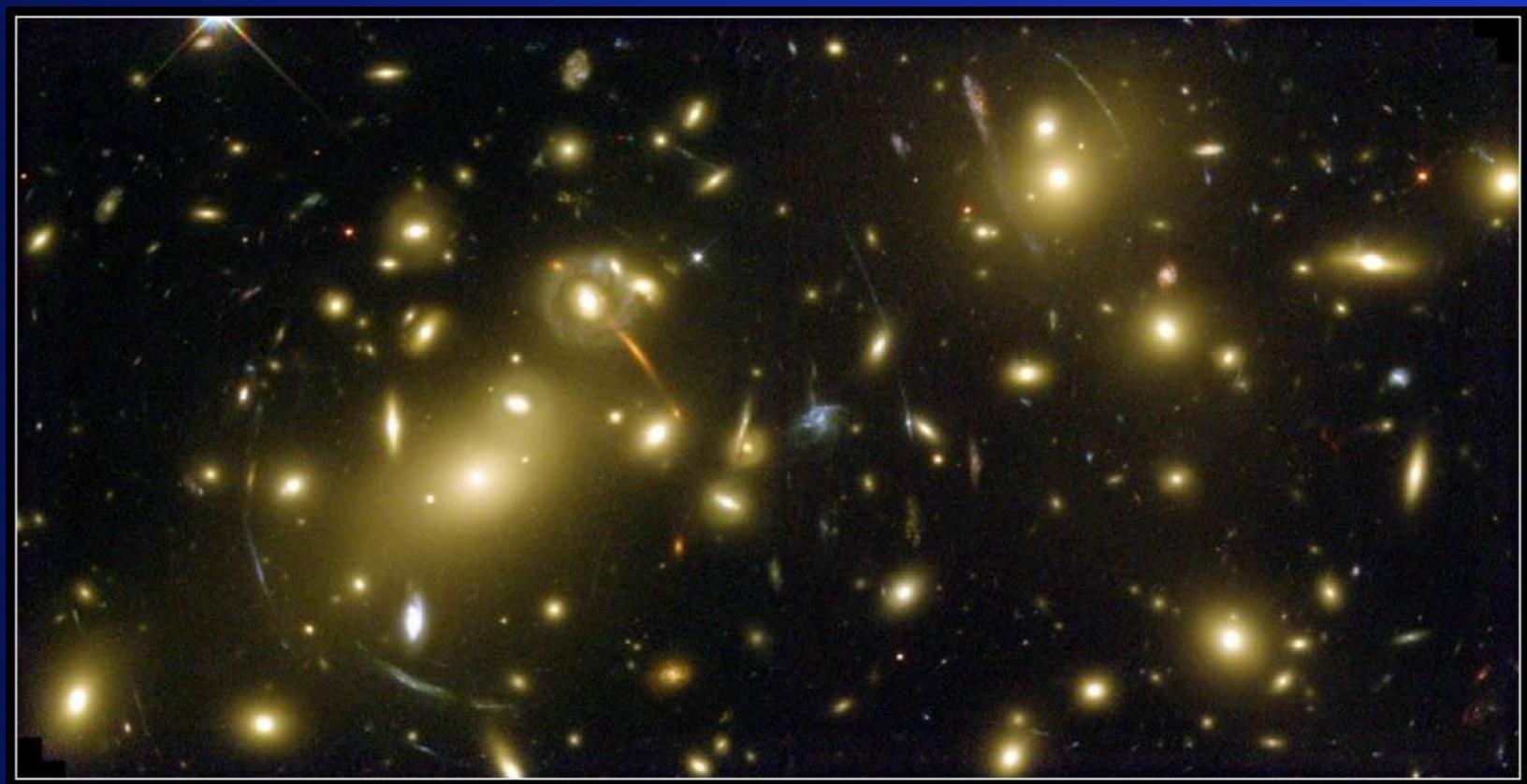


世界でみられる皆既日食

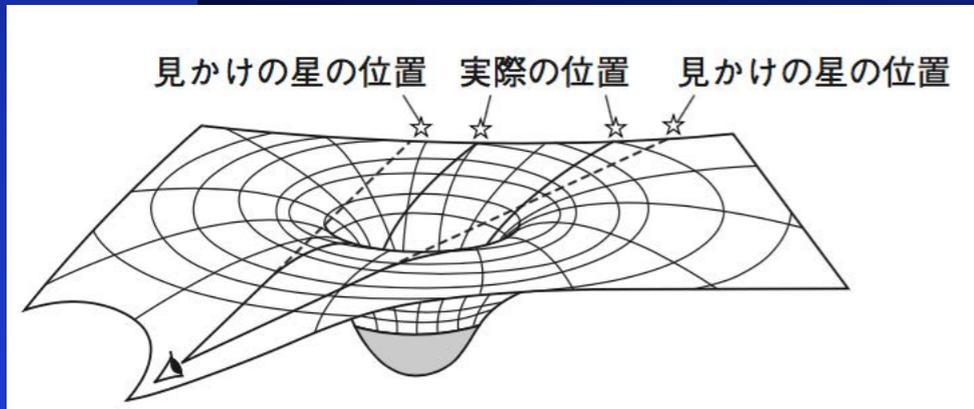
日付	種類	食の経路等
2012年11月14日	皆既	オーストラリア北部から南太平洋を通過し、チリの西方洋上で終わる。ニュージーランド北島で食分0.8前後。
2015年3月20日	皆既	グリーンランド、アイスランドの南沖から北極を通過。ユーラシア北西部・北アフリカで部分食を観測できる。
2016年3月9日	皆既	インドネシアを通過し北太平洋に至る。日本では全国で部分食が見られる。
2017年8月21日	皆既	北太平洋中部に始まり北米大陸を横断、中部大西洋で終わる。
2019年7月3日	皆既	南太平洋、南米のチリ、アルゼンチンで観測できる。
2020年12月14日	皆既	太平洋西部に始まり南米大陸南部を通過、アフリカ南西岸沖で終わる。
2021年12月4日	皆既	南極大陸の南米側で観測できる。
2023年4月20日	皆既	南インド洋からオーストラリア北西岸、インドネシアを経て中部太平洋。九州・四国・東海・関東の南岸でも僅かに欠ける。
2024年4月8日	皆既	中部太平洋に発し北米大陸東部を北上、ヨーロッパ沖に至る。
2026年8月12日	皆既	北極、グリーンランドからイベリア半島に達する。
2027年8月2日	皆既	北大西洋中部からアフリカ北岸、アラビア半島南岸を通過しインド洋に至る。
2028年7月22日	皆既	インド洋に発しオーストラリア、ニュージーランドを横断する。
2030年11月25日	皆既	南アフリカ、南インド洋、オーストラリアを通る。
2031年11月14日	皆既	北西太平洋に始まり赤道付近を経過してパナマ付近に達する。
2033年3月30日	皆既	ベーリング海峡から北極にかけて起こり、北米大陸、シベリア東端とグリーンランドで部分食が見える。
2034年3月20日	皆既	南米東沖からアフリカ中部、アラビア半島を通り中国奥地で終わる。
2035年9月2日	皆既	中国奥地から日本を横断、太平洋東部で終わる。日本では能登半島と茨城県を結ぶ一帯で中心食が見られる他、全国で部分食。1970年頃までの古い書籍では東京を中心食が通るように書いてあるが、東京は食分0.992で部分食。

一般相対性理論の予言 【光の曲がり】

重力レンズ



Galaxy Cluster Abell 2218 HST • WFPC2
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08





ブラックホールの周りで
光は曲がる



大阪工業大学 前学長 井上正崇 名誉教授

2015年8月 工学実感フェアにて撮影, 重カレンズプログラムで画像処理



大阪工業大学 学長 西村泰志 教授

2015年8月 工学実感フェアにて撮影, 重カレンズプログラムで画像処理

一般相対性理論の予言【GPS】

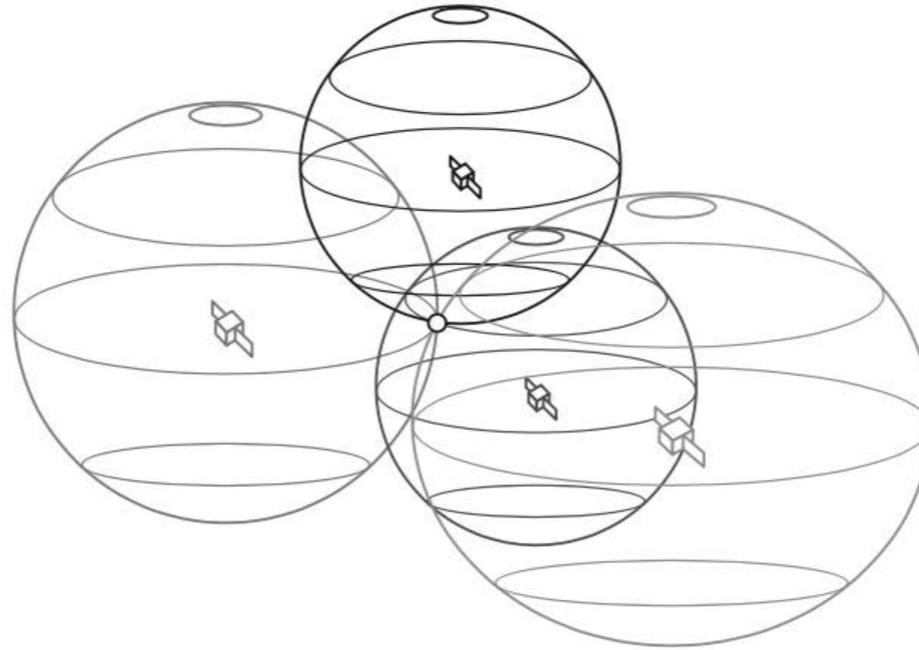
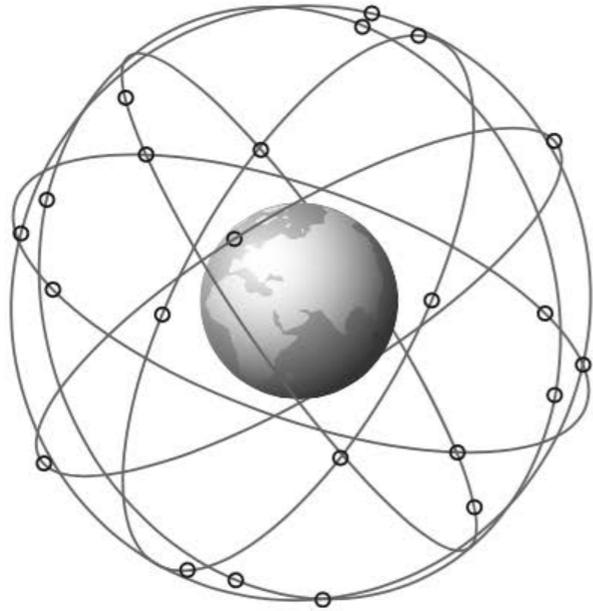


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で,

3 角測量 → 精度 $\pm 15\text{m}$

高速飛行の特殊相対論効果と

地球重力の一般相対論効果

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



一般相対性理論は正しい

一般相対性理論(1915年)

● 発端：

1905年の相対性理論では、加速度を扱えなかった。

加速度の正体は何だろうか？

加速度を生じさせる**重力**とは何だろうか？

● ブレークスルー：

エレベータの自由落下で重力が消せる！

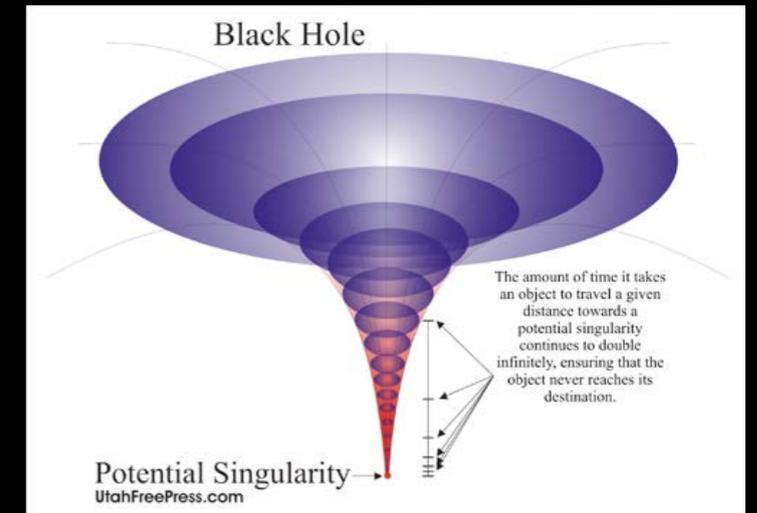
だけど、地球の大きさのエレベータでは消せない。

● **アインシュタインの結論：**

重力の正体は**時空の歪み**である。

ブラックホール

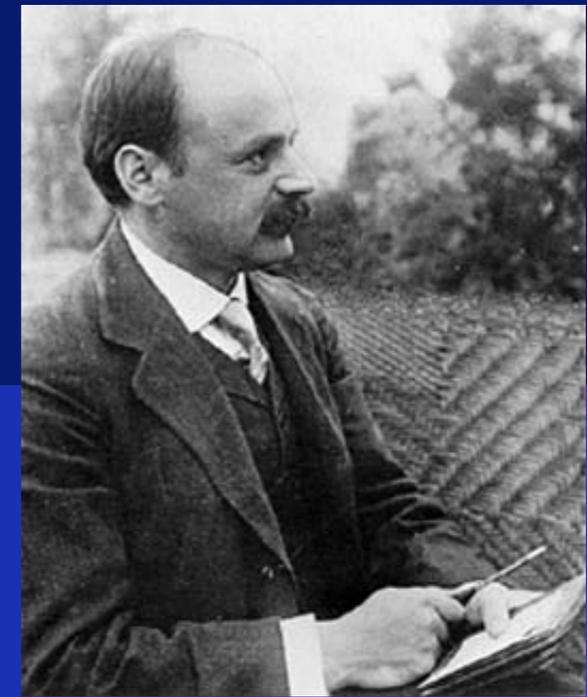
Black-hole



まず、方程式を解いたのは、シュバルツシルドだった。

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

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

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

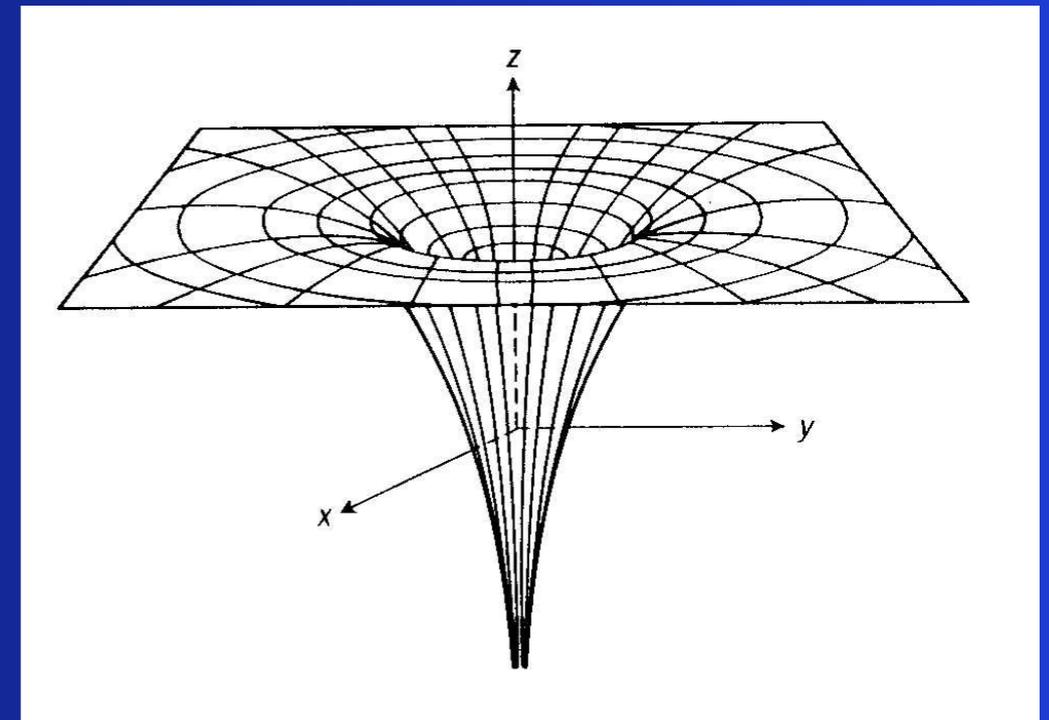
困ったことに, ……

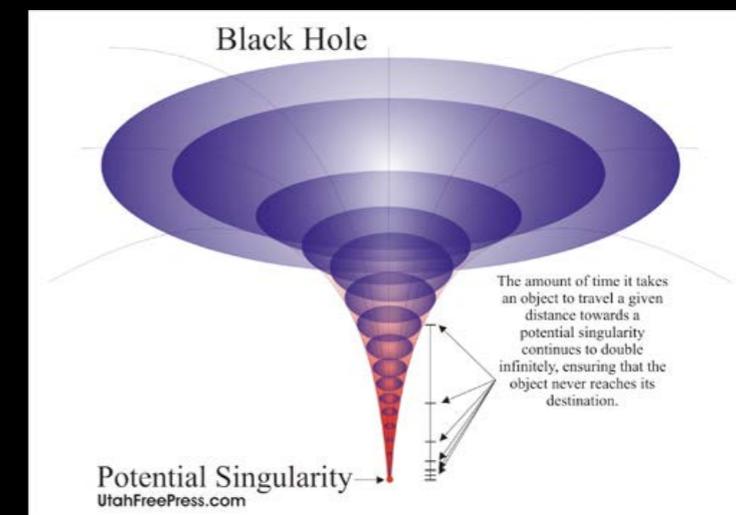
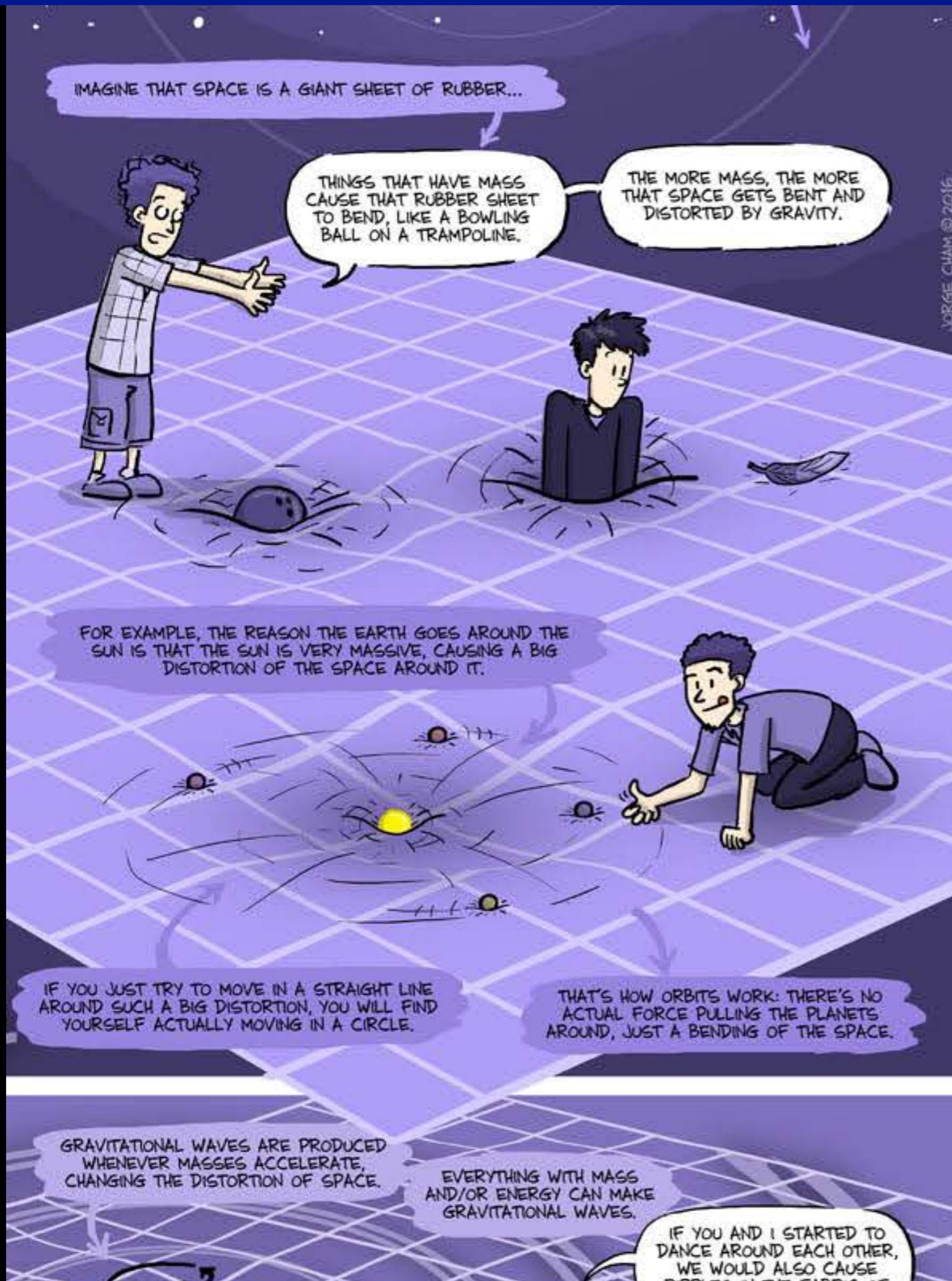
$r=0$ で特異点

⇒ 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

=重力が強すぎて、光さえも出られない天体

=因果的に隔離される領域

境界=地平面 (ホライズン)

重い物体のまわりでは時空がゆがむ。

非常に重い物体のまわりでは時空が大きくゆがんで、ブラックホールになる。

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

大きさはシュワルツシルト半径 r

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

(M :物体の質量, G :重力定数, c :光速)

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

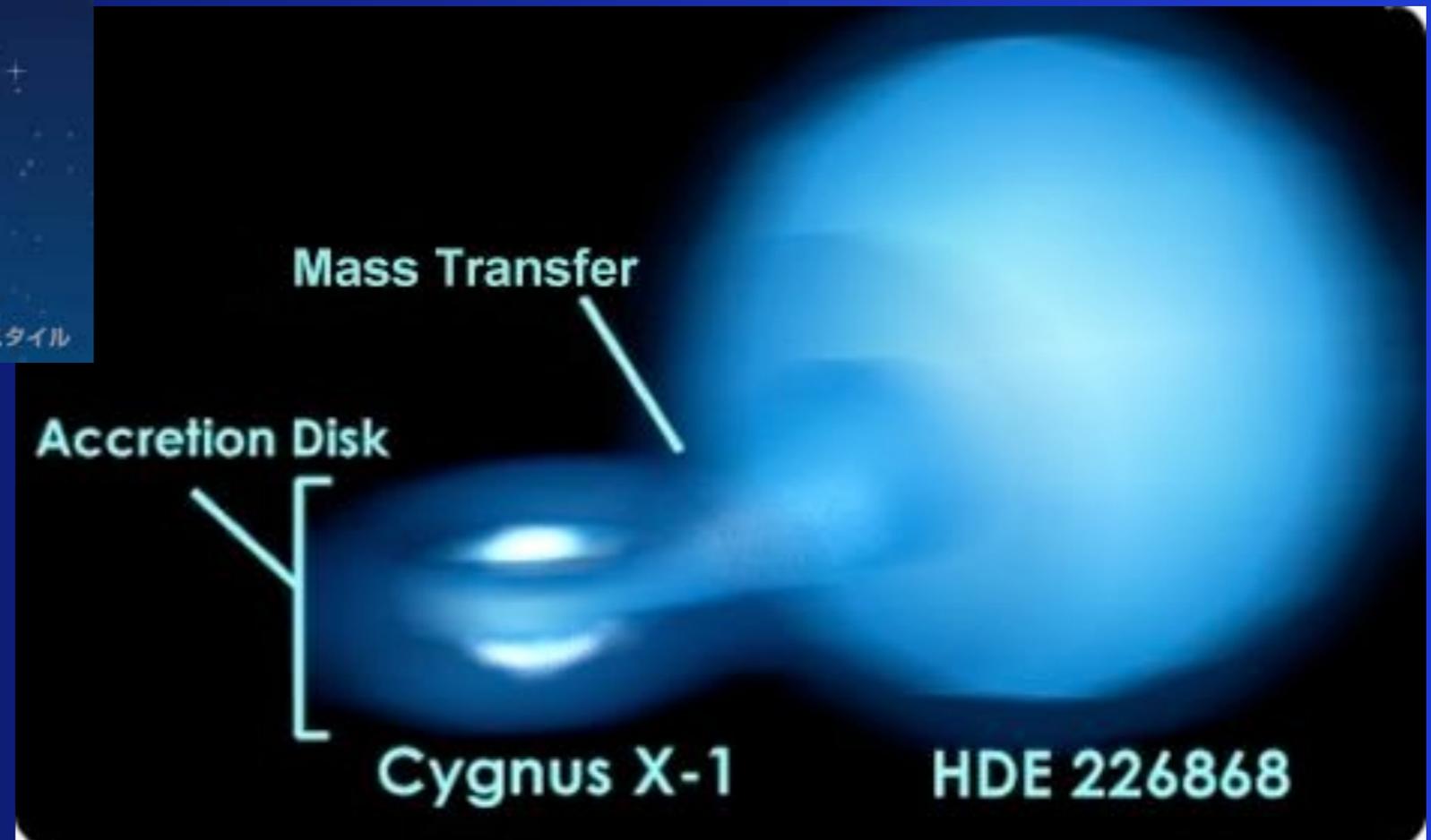
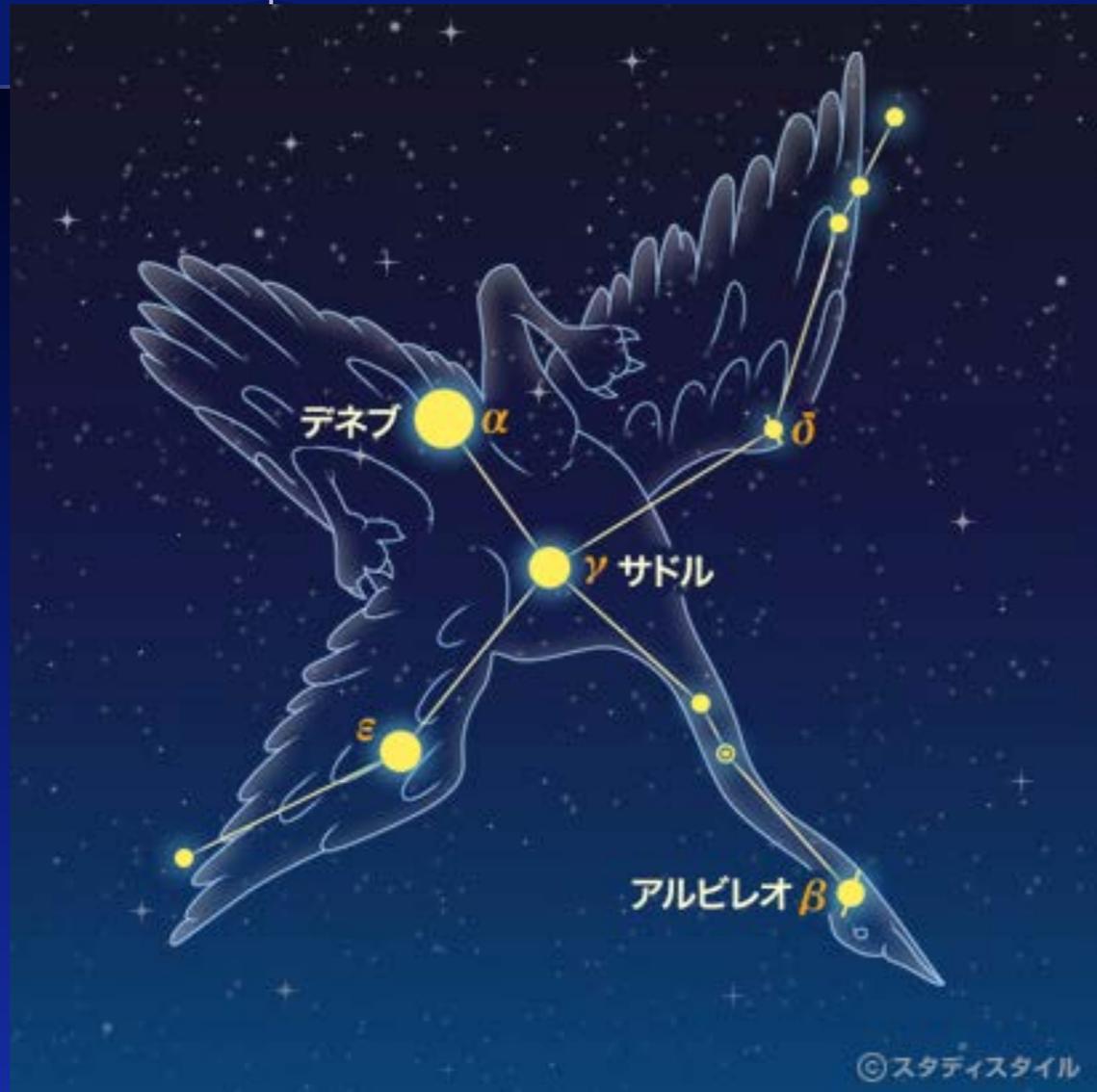
光さえも脱出できない、巨大な重力をもつこんな天体を「ブラックホール」と命名しよう。

ホイーラー

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

はくちょう座 X-1はブラックホール



銀河系の中心にも巨大ブラックホール

THE MILKY WAY



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 nebulae, 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—massive but felt through its gravitational effects—extend beyond that.
2. War clouds of interstellar dust block much of our sight.

My view of the Milky Way, which from our position in the far galactic disk appears as a fuzzy band of light, is shown in a 3-D view through the dust to reveal the galaxy's structure. Earth's orbit around the sun lies at a severe angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the whirlpool motion of molecular gas in the inner part of our galaxy. Gas moving away from Earth has a red shift, while gas moving toward Earth has a blue shift. The diagram (see opposite) shows the gas's motion as it swirls around the galactic center. The gas is most dense and turbulent near the center of the Milky Way, producing

This computer-generated image of the Milky Way—one perspective of a 3-D model newly compiled for Microsoft's *Galaxy.com*—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulae.

- Star clusters
- Interstellar gas and dust
- Planets
- Major star regions
- Galactic disk
- Galactic bulge or core
- Outer star regions

Reference numbers for galaxies, nebulae, and star clusters are shown in the bottom left corner.

PLANETARY NEBULA NGC 630

Earth's inhabitants of the Milky Way, colorful nebulae and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Even a handful of the most star-strewn galaxies are found a vast distance away.

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 Helix NGC 630. At its center shines

PLANETARY NEBULA NGC 630

...a small, hot core, which will cool and fade over time to come its stellar rest. Streams of charged particles, rays outward in opposite directions, like exhaust from back-to-back jet engines. This structure, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulae. Ultraviolet light from the star heats the gas, causing it to glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark matter-rich interstellar dust that blocks our view of stars beyond. When a star reaches a dark nebula, the dust particles reflect starlight and the laws

PLANETARY NEBULA NGC 630

of physics, however, every star in the cluster is about the same size, billions of years older than our 4.5-billion-year-old sun.

Feeding interstellar dust clouds toward the central bulge of the Milky Way, the Hubble Space Telescope focused on a rare clear region in the Sagittarius star cloud (above right). These interstellar 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, star formation is blocked. In others, it's just getting started. A star 22 times as massive as the sun and 70,000 times brighter, it sports a disk of interstellar dust, which here is taken color, about 20,000 times wider than Earth's.

PLANETARY NEBULA NGC 630

Light from the hot star is absorbed by and scatters the dust, creating a glow. As stars like the sun die, they become factories for interstellar dust. Celestial soap—the remnants of its red giant stage—surrounds the star. The star's outer layers are blown away, leaving a cloud of gas and dust. The star's outer layers are blown away, leaving a cloud of gas and dust.

PLANETARY NEBULA NGC 630

...a small, hot core, which will cool and fade over time to come its stellar rest. Streams of charged particles, rays outward in opposite directions, like exhaust from back-to-back jet engines. This structure, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulae. Ultraviolet light from the star heats the gas, causing it to glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark matter-rich interstellar dust that blocks our view of stars beyond. When a star reaches a dark nebula, the dust particles reflect starlight and the laws

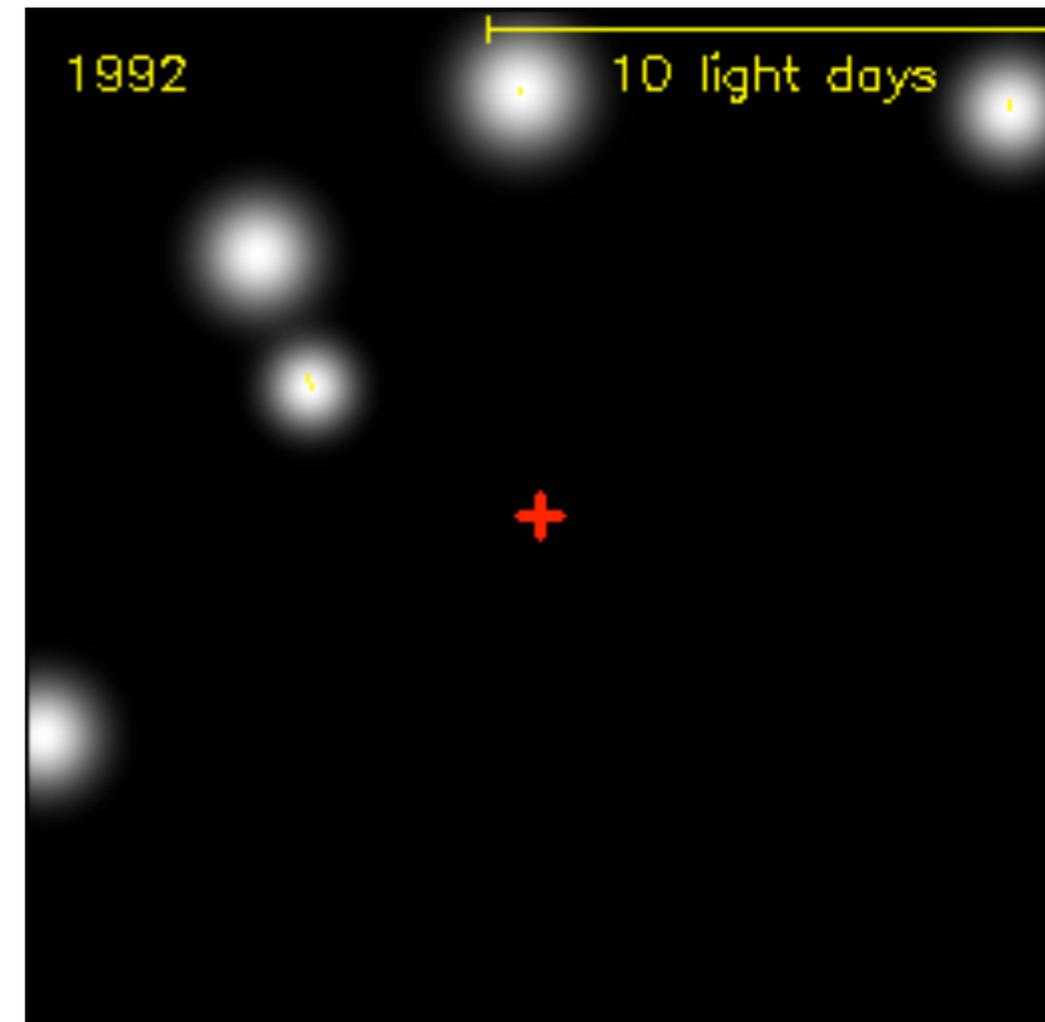
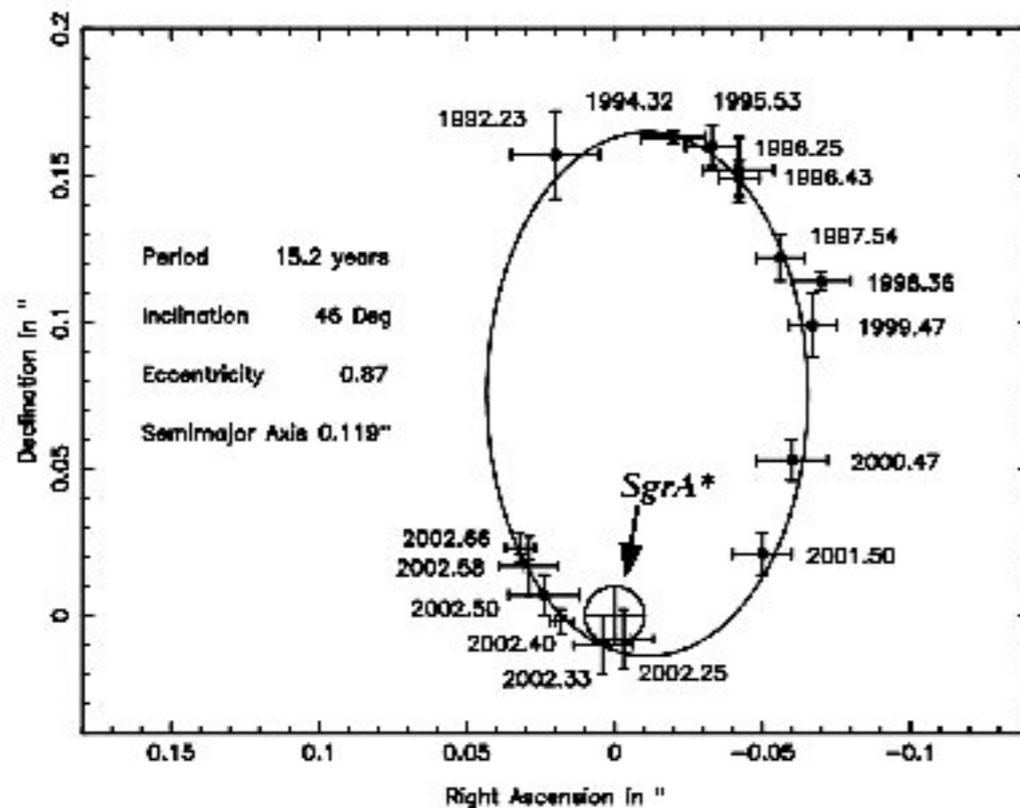
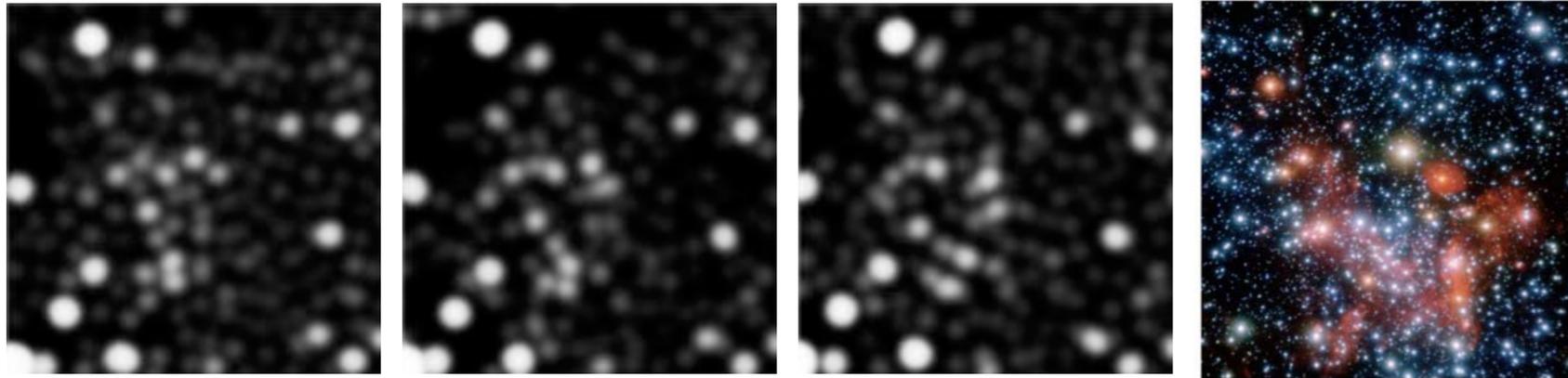
PLANETARY NEBULA NGC 630

...a small, hot core, which will cool and fade over time to come its stellar rest. Streams of charged particles, rays outward in opposite directions, like exhaust from back-to-back jet engines. This structure, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulae. Ultraviolet light from the star heats the gas, causing it to glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark matter-rich interstellar dust that blocks our view of stars beyond. When a star reaches a dark nebula, the dust particles reflect starlight and the laws

PLANETARY NEBULA NGC 630

...a small, hot core, which will cool and fade over time to come its stellar rest. Streams of charged particles, rays outward in opposite directions, like exhaust from back-to-back jet engines. This structure, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulae. Ultraviolet light from the star heats the gas, causing it to glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark matter-rich interstellar dust that blocks our view of stars beyond. When a star reaches a dark nebula, the dust particles reflect starlight and the laws

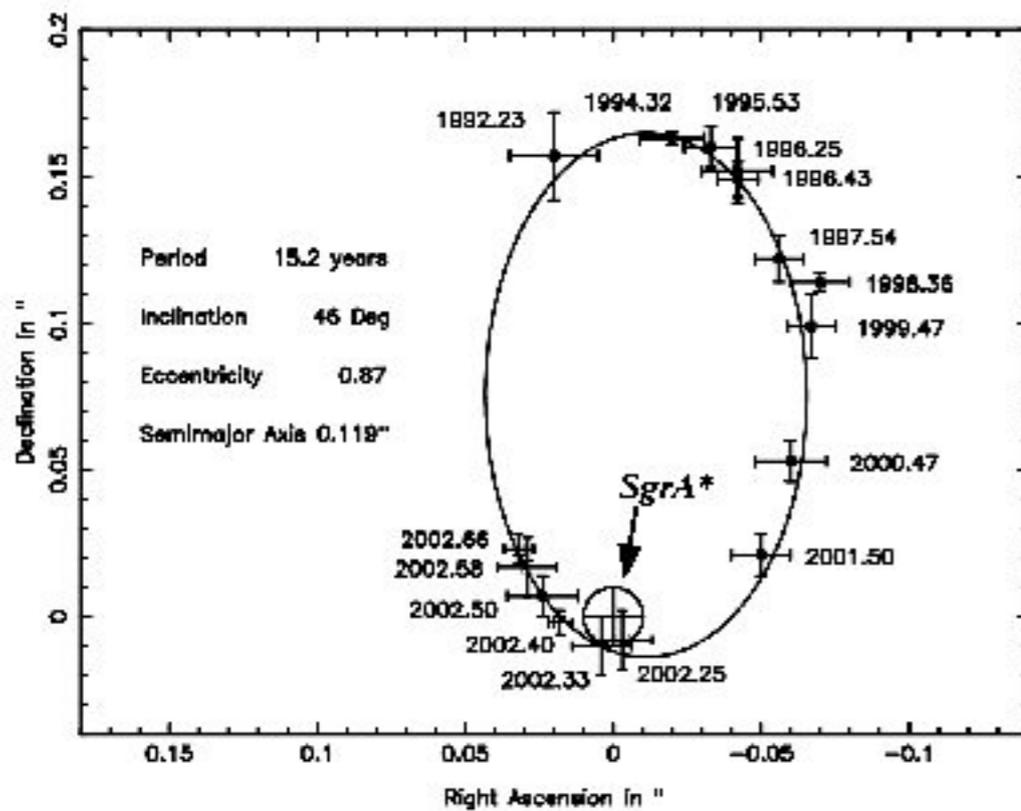
S2 orbit around Sgr A*



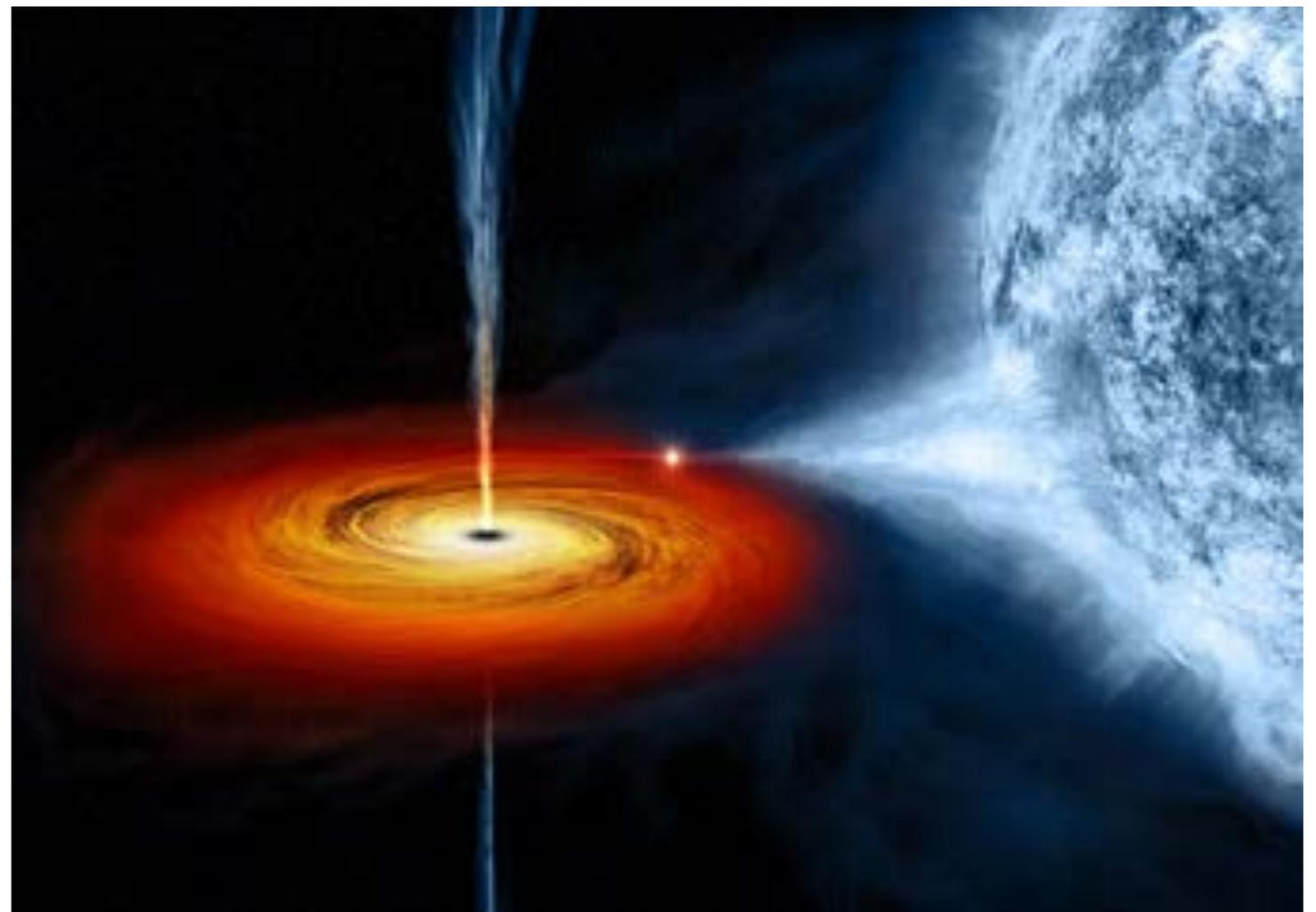
<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

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

ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？



周りの星の激しい運動から
強い重力源であることがわかる

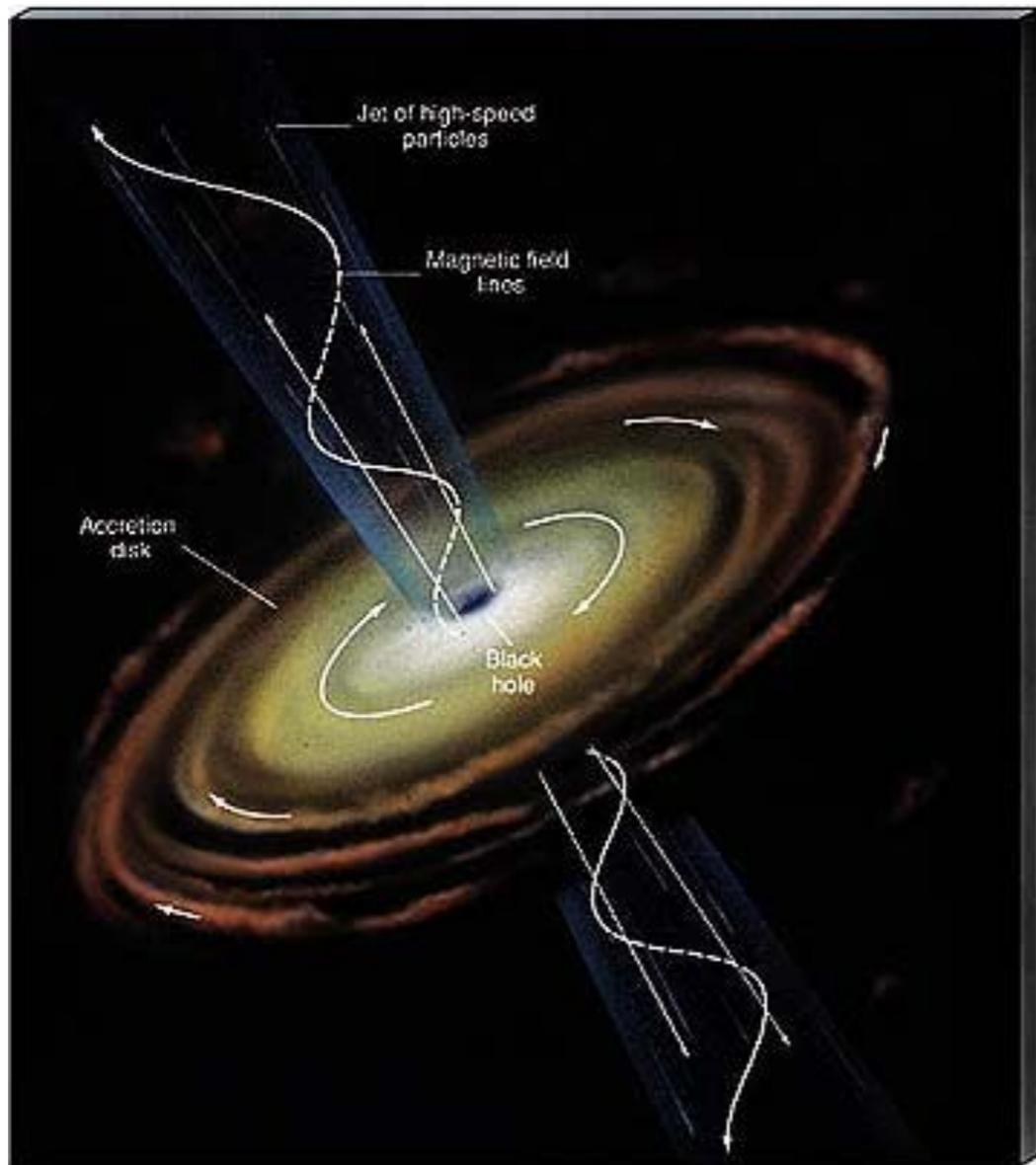


落下していくガスが
高い温度で輝く

(降着円盤 accretion disk)

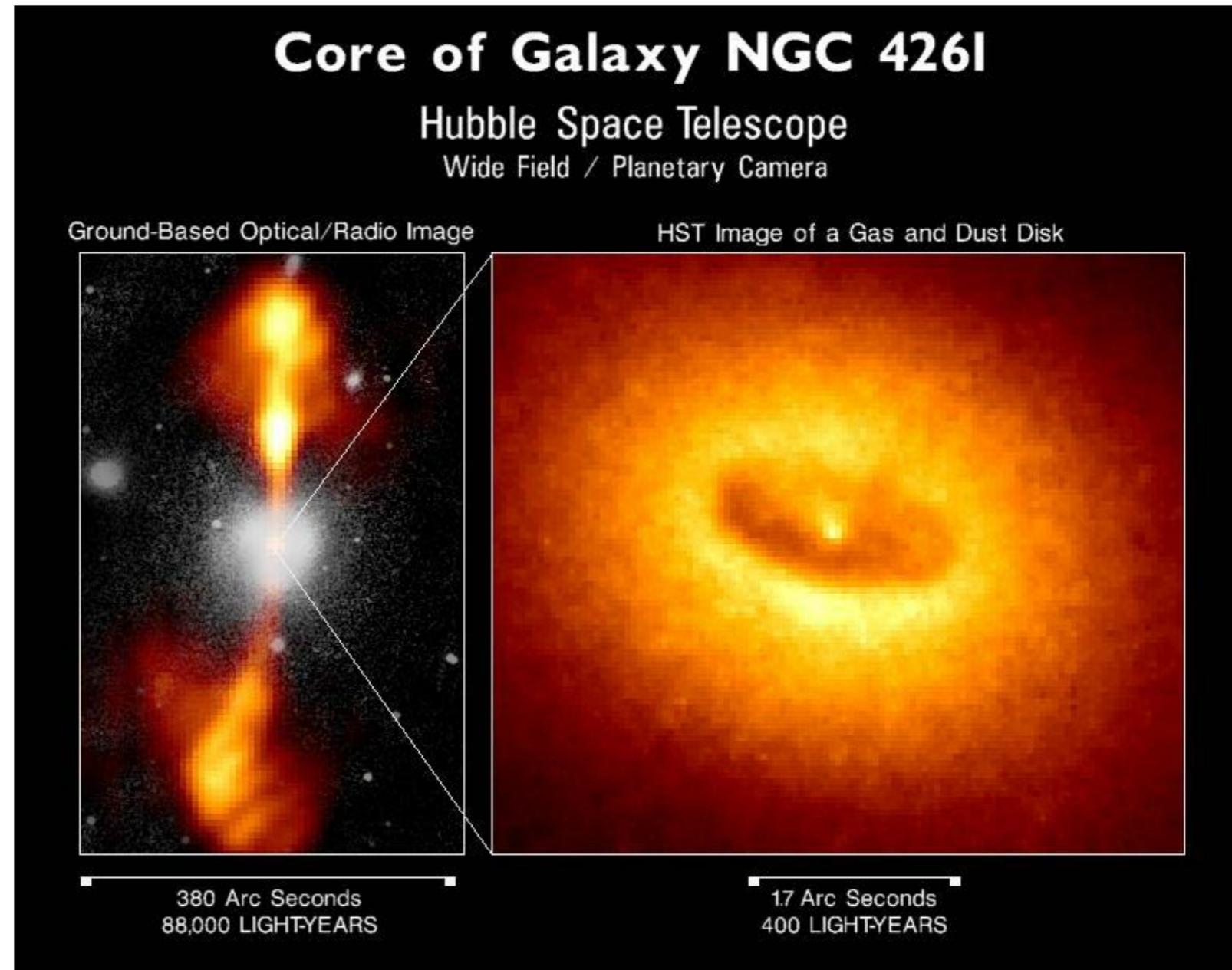
想像図

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)



Interstellar (2014)



Executive Producer: Kip Thorne

<https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo>

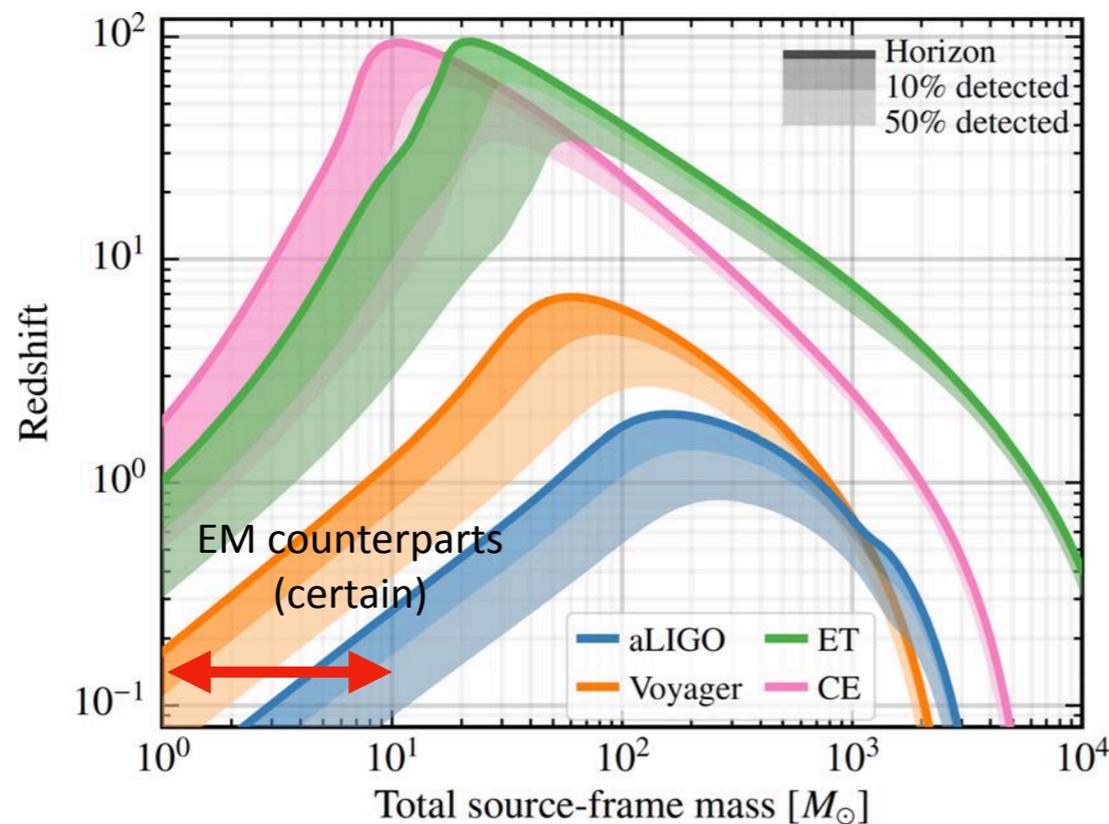
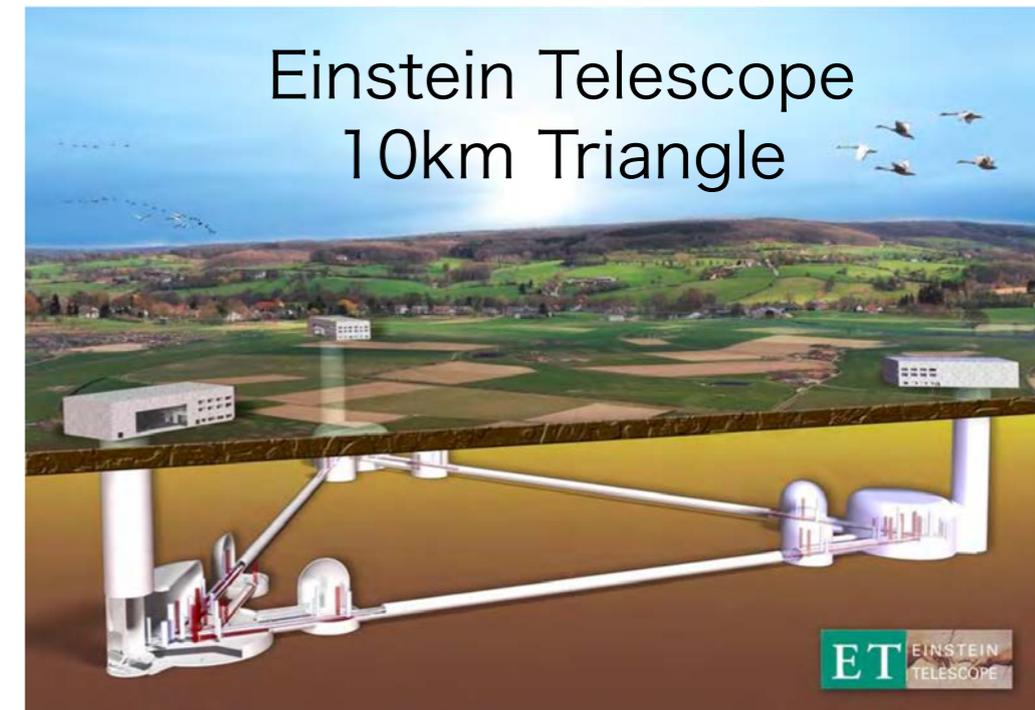
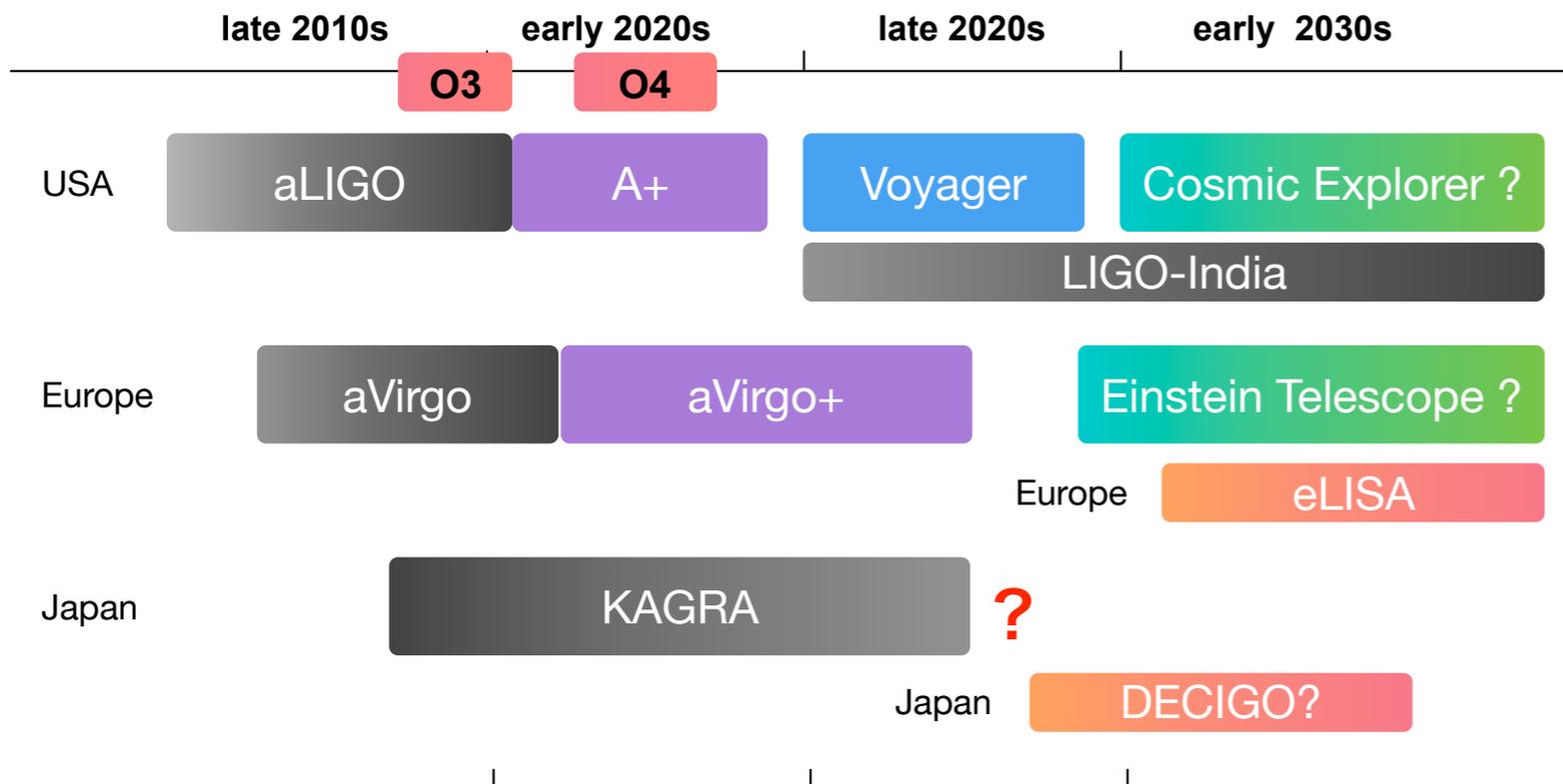


Interstellar (2014)

Executive Producer: Kip Thorne

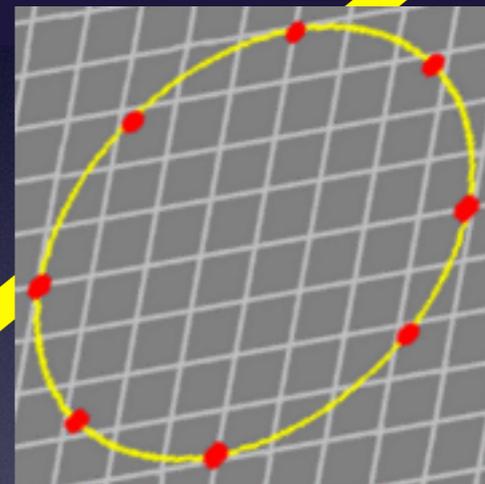
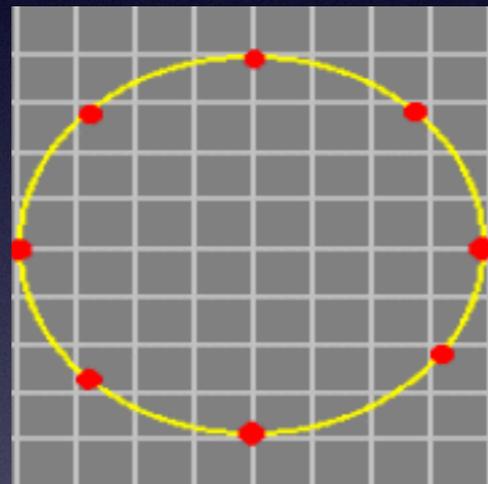
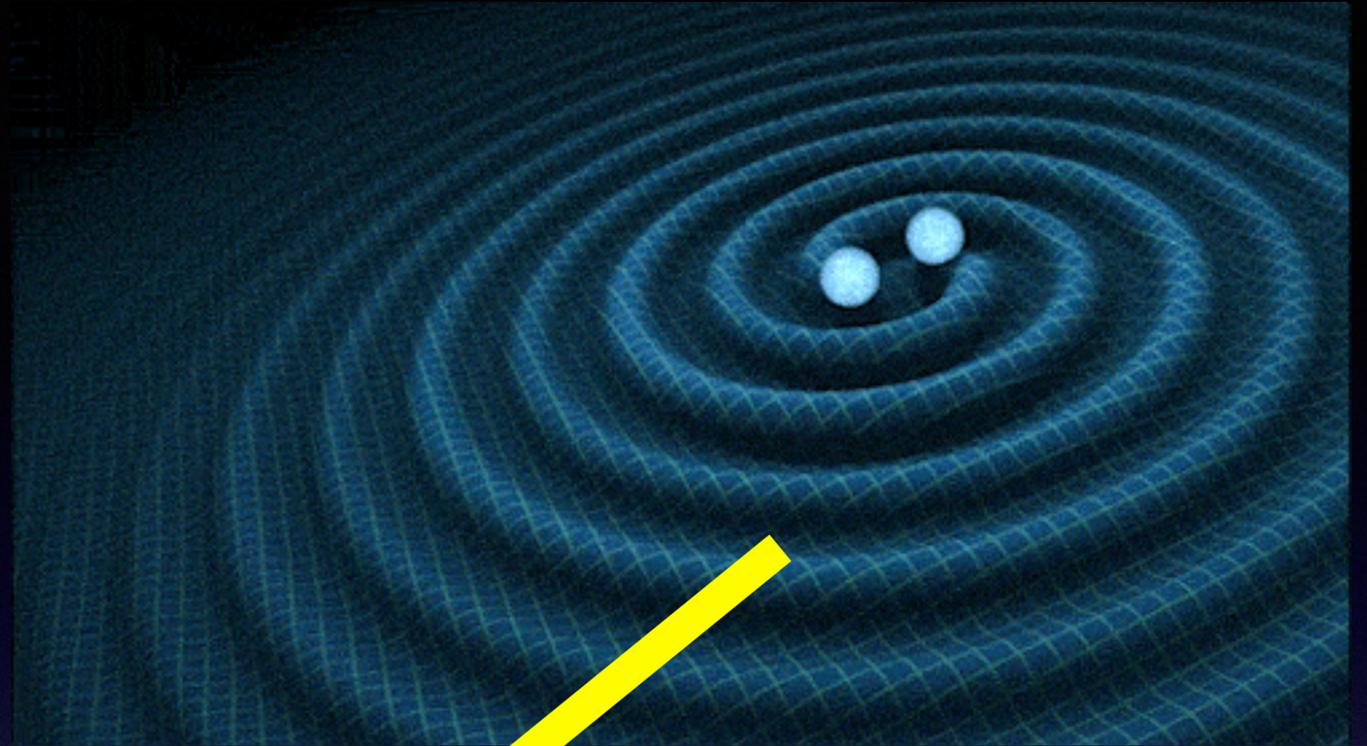
<https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo>

重力波観測の将来計画



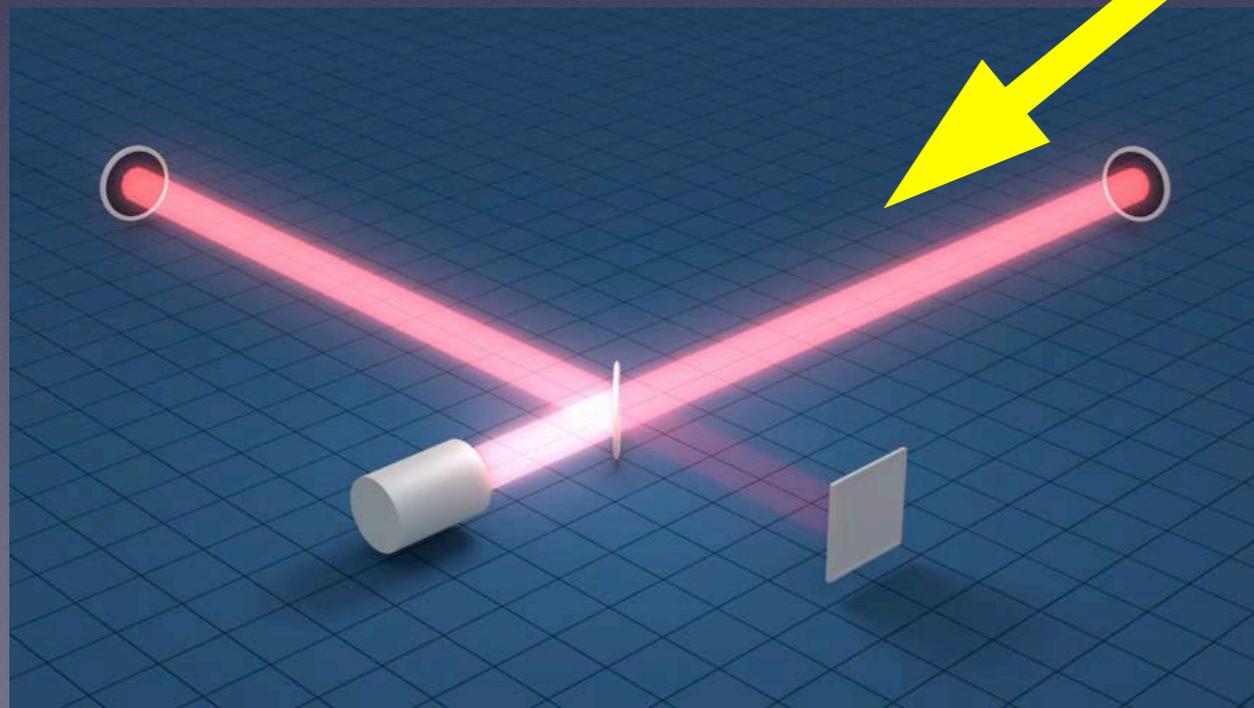
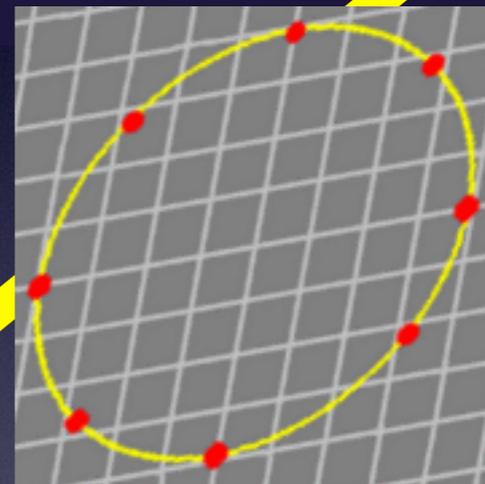
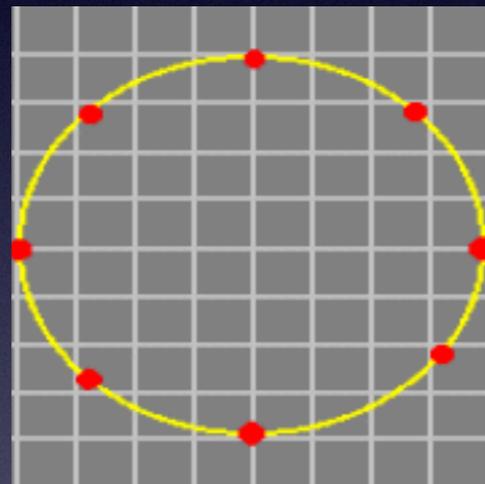
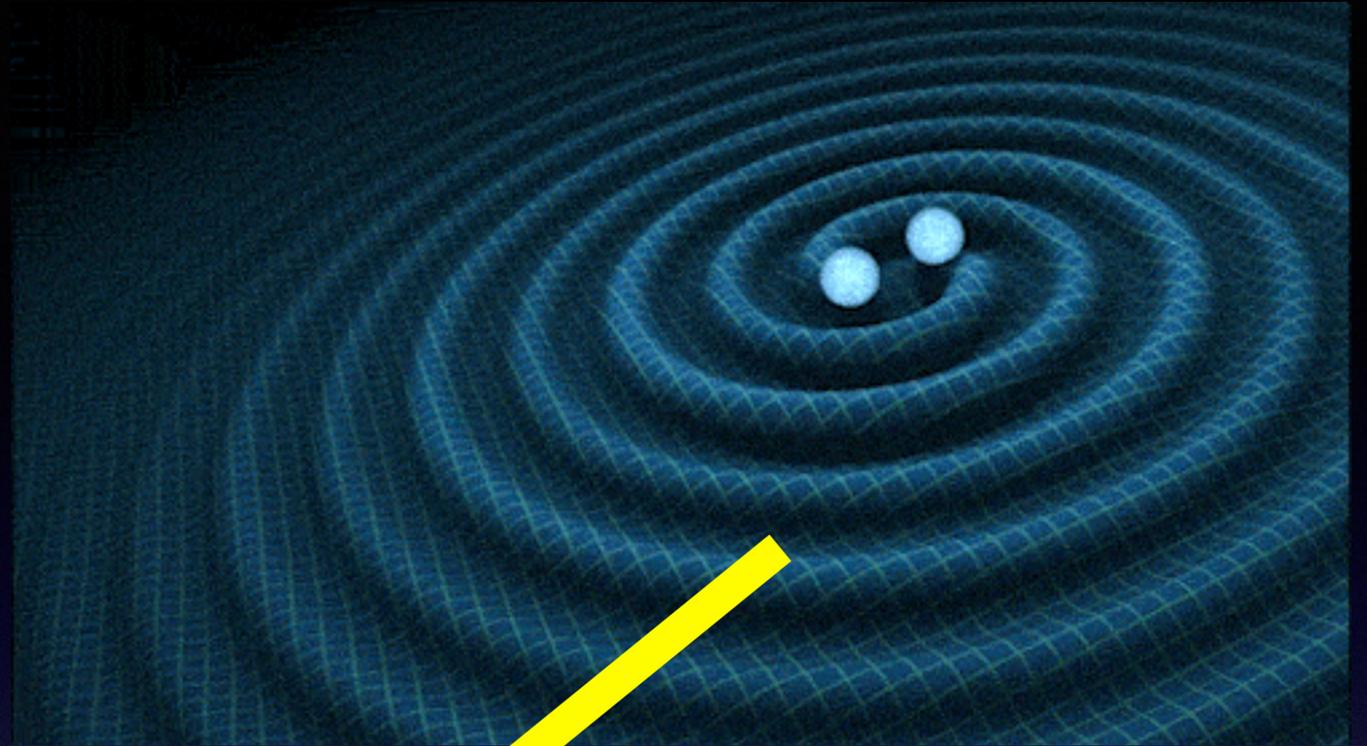
Evan Hall, MIT

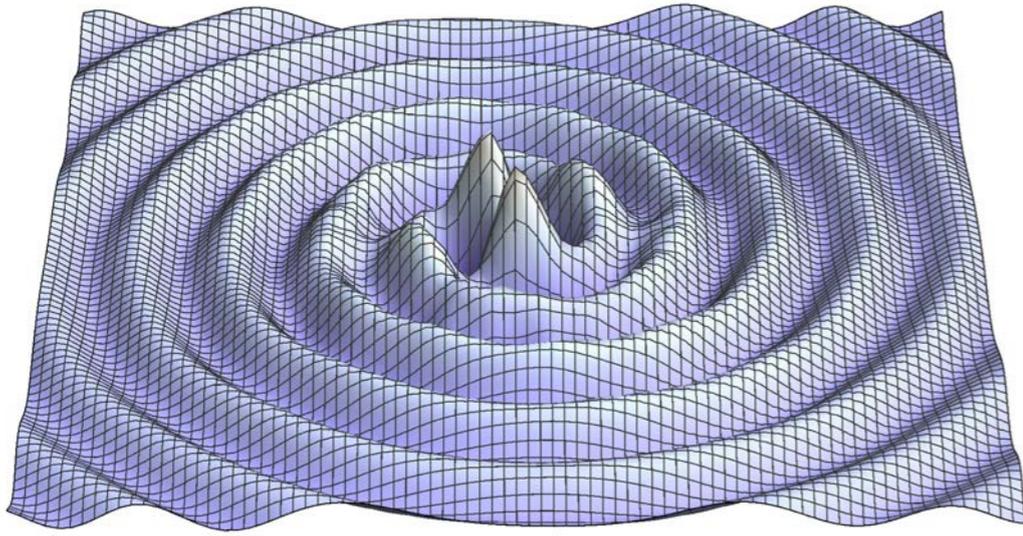
重力波の発生と伝播



レーザー干渉計

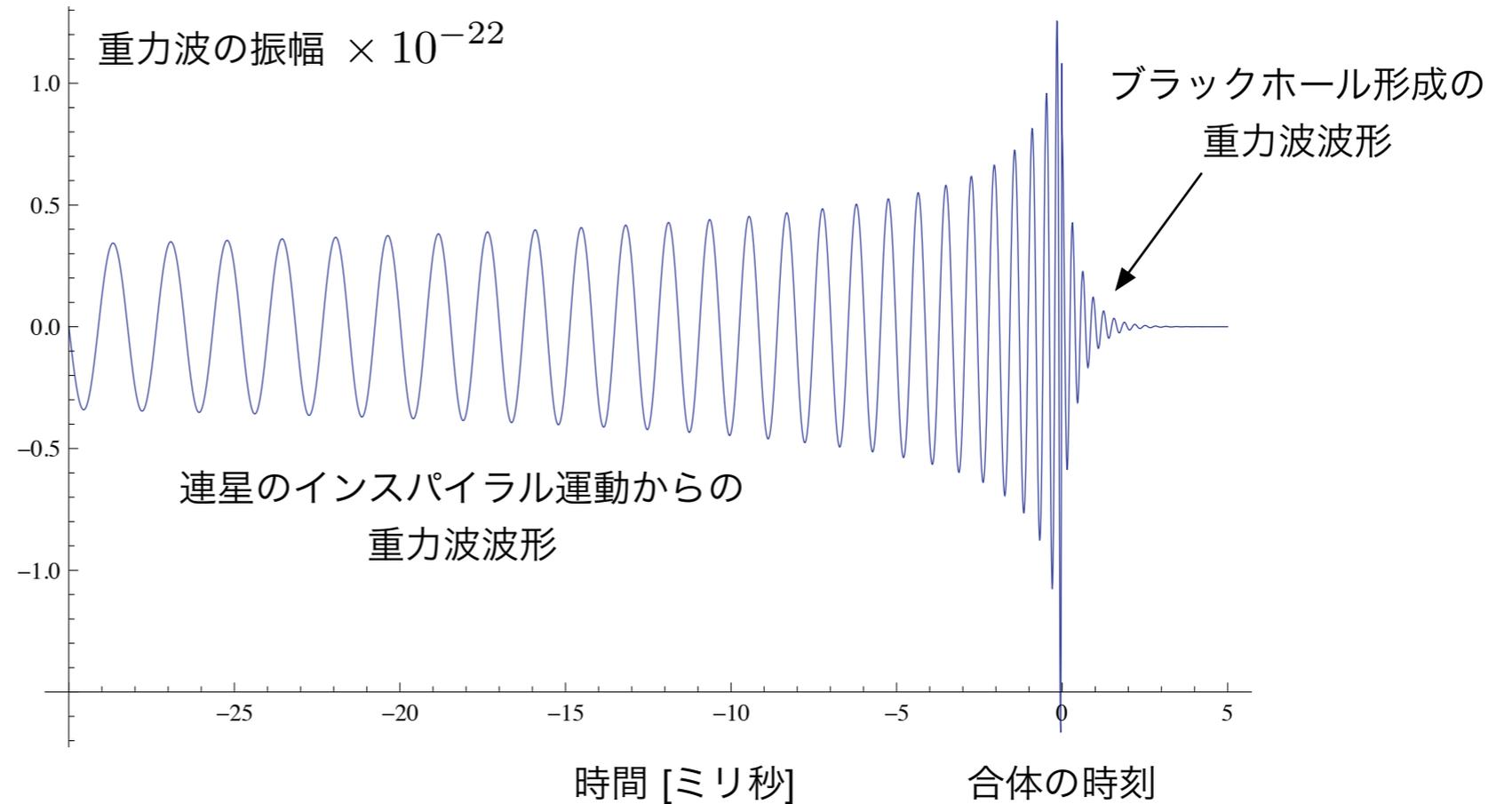
重力波の発生と伝播





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

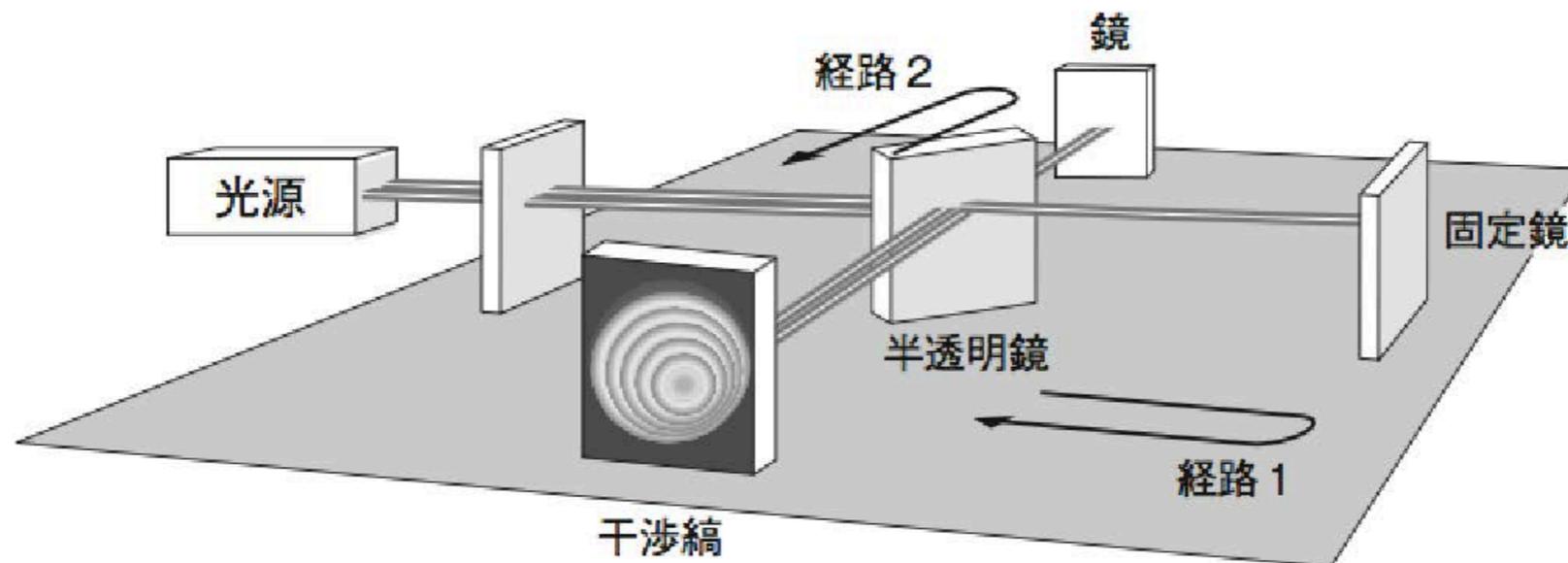


LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

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

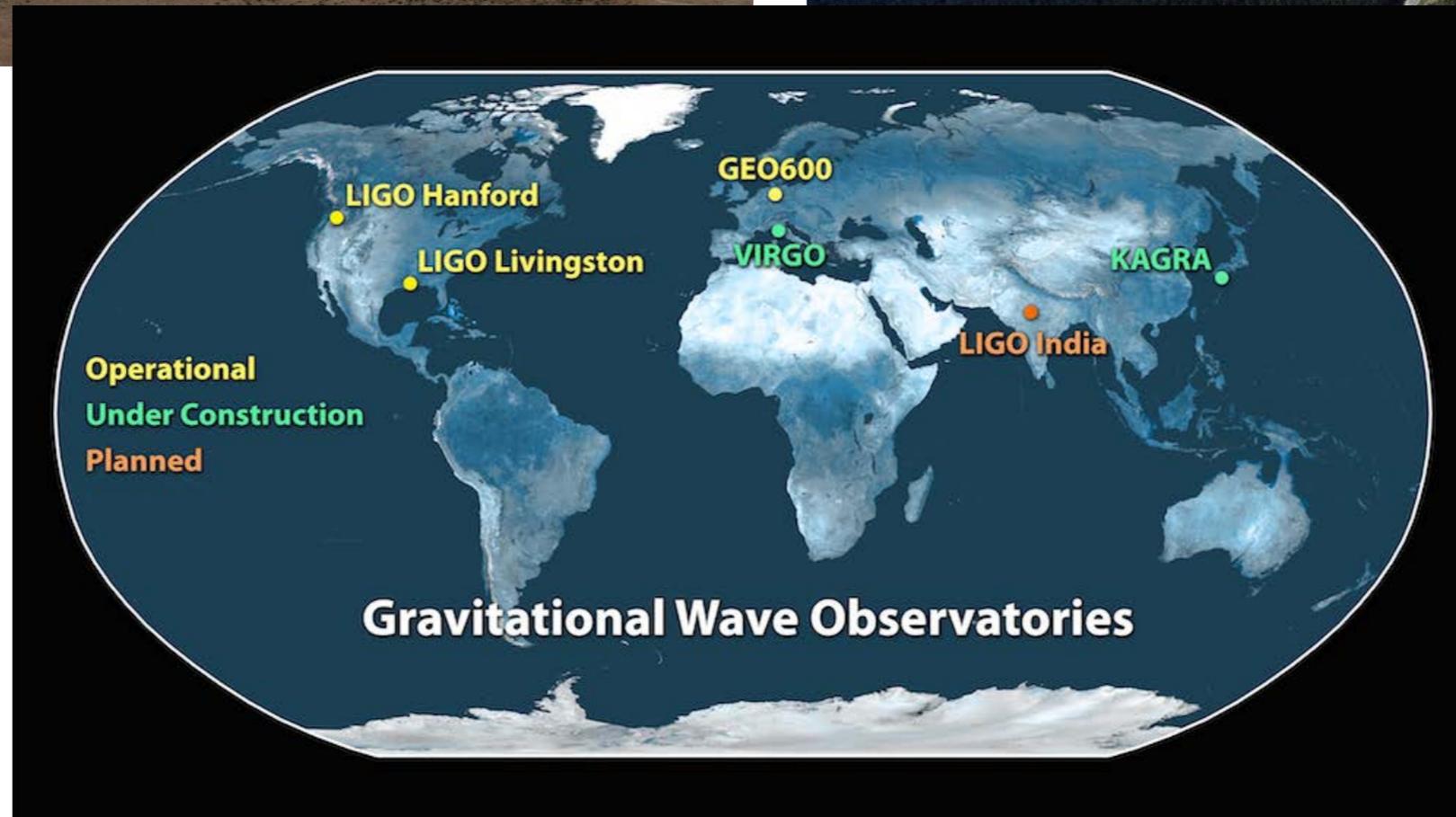


<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

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



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

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

大型低温重力波望遠鏡



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

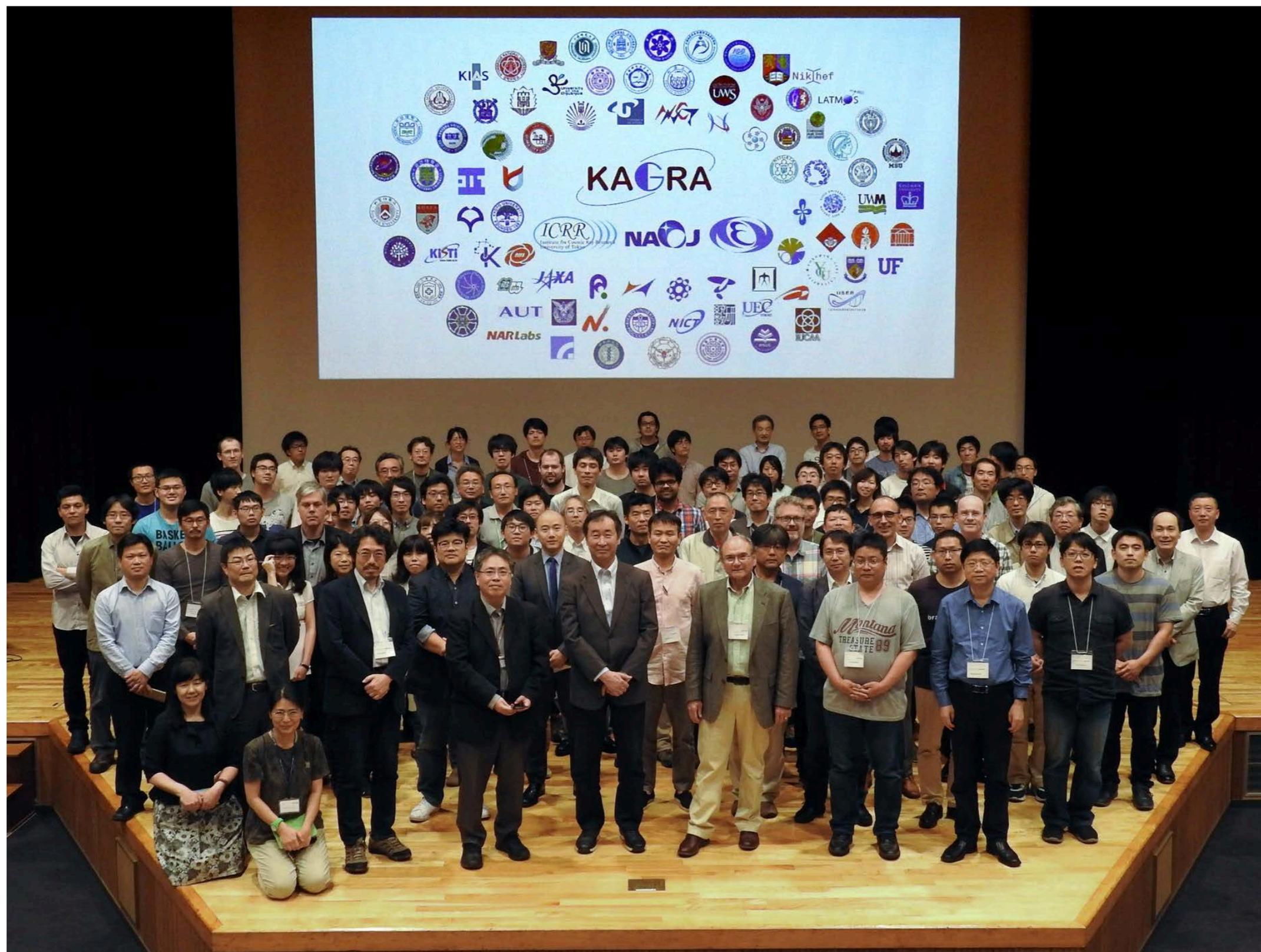
望遠鏡を神岡鉱山内に建設
地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

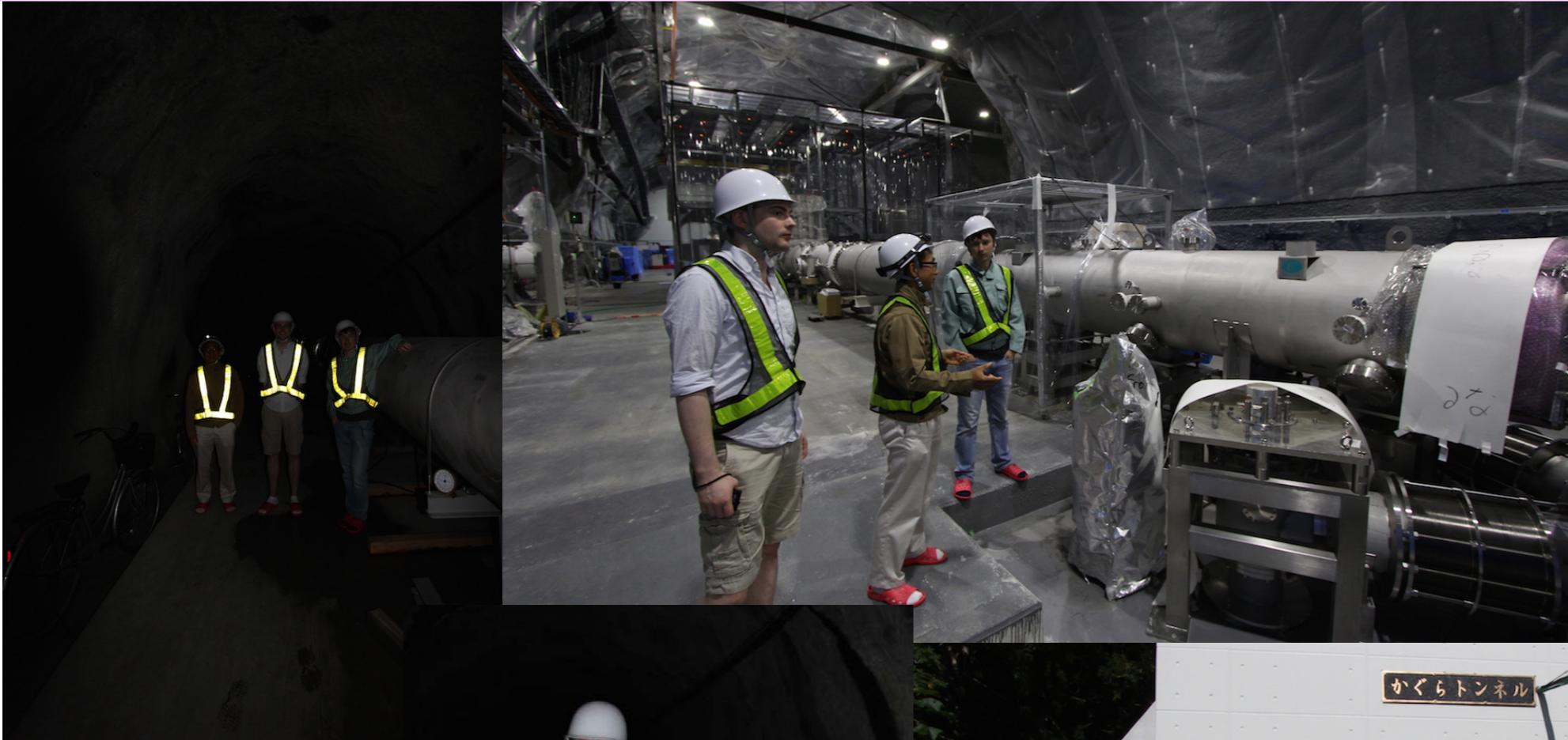
鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

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)

2015年8月



Hisaaki Shinkai



Seiji Kawamura

Kieran Craig

Martynov Denis

重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

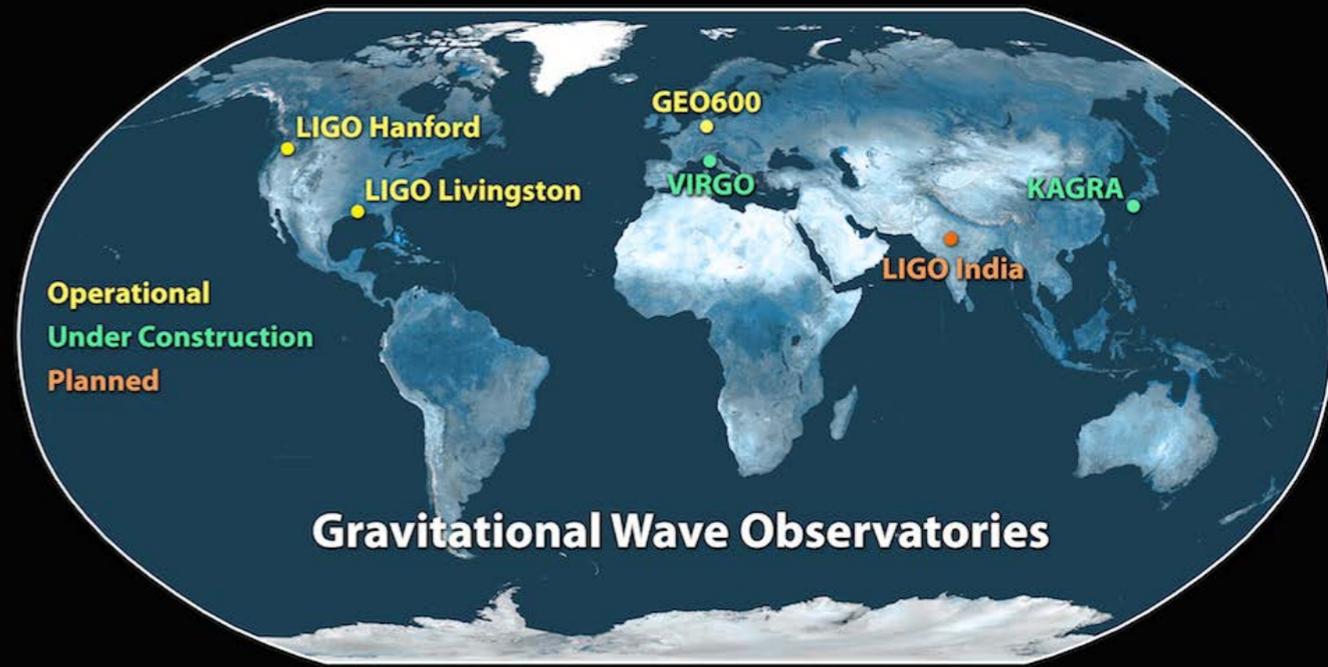
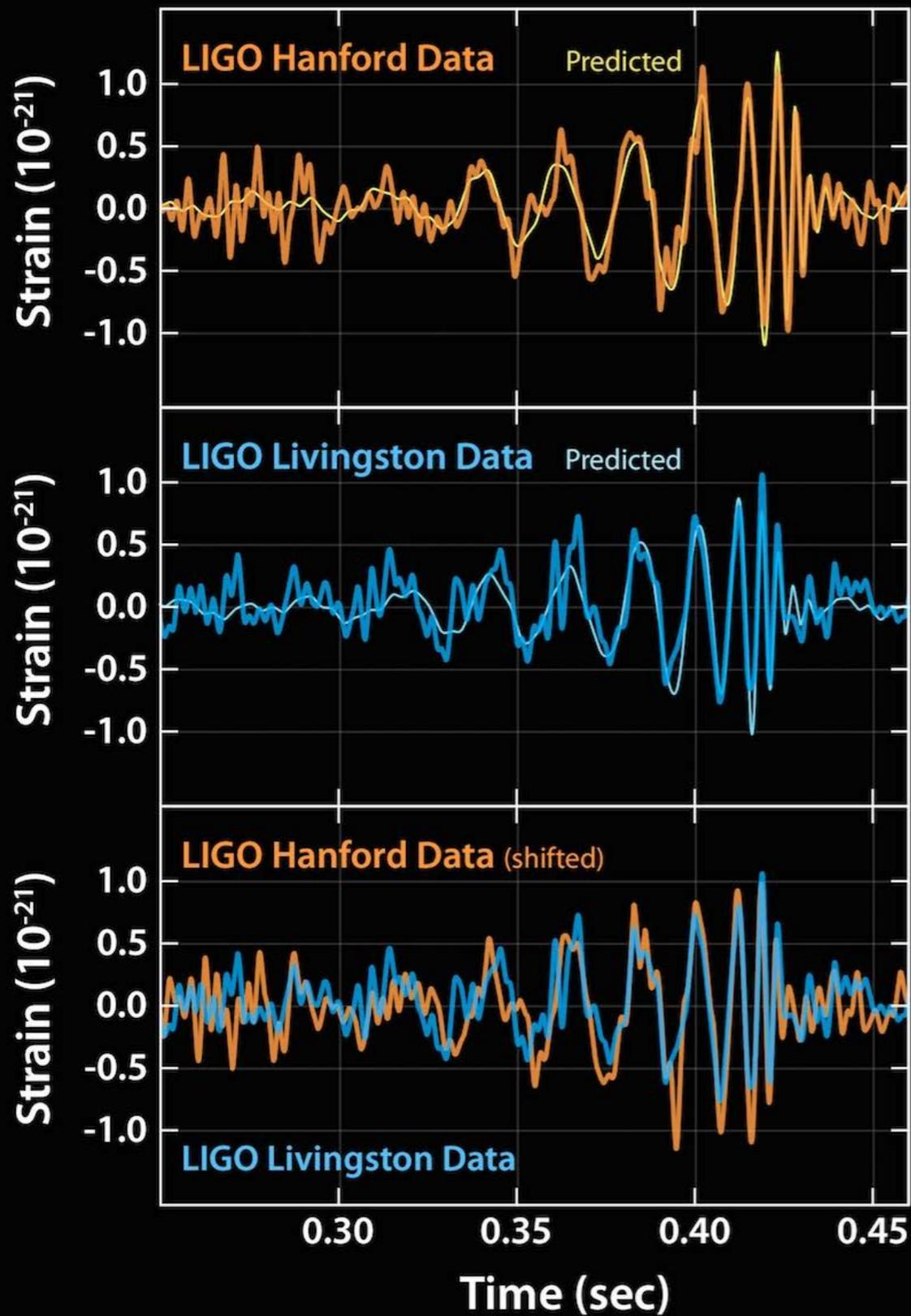


“We had detected gravitational waves. We did it.”

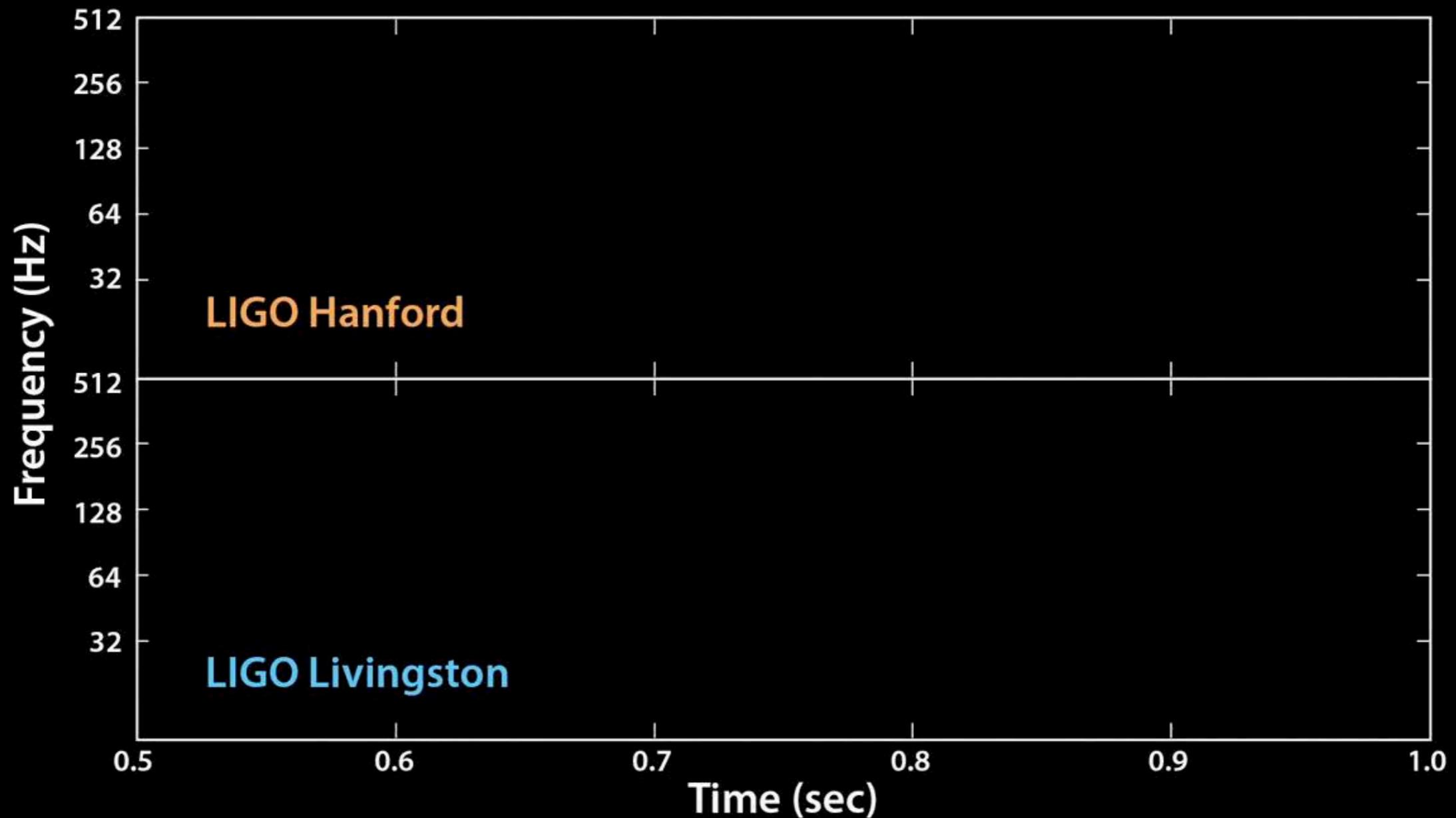
“我々は、重力波を検出した。やり遂げたのだ。”

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

2015年9月14日



重力波波形を音にすると. . .



始め2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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

重力波 初の直接観測

「研究者勇気づけた」

大阪市大院・神田教授 学生らに解説

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらおう狙い。学生ら約1000人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【畠山哲郎】



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

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

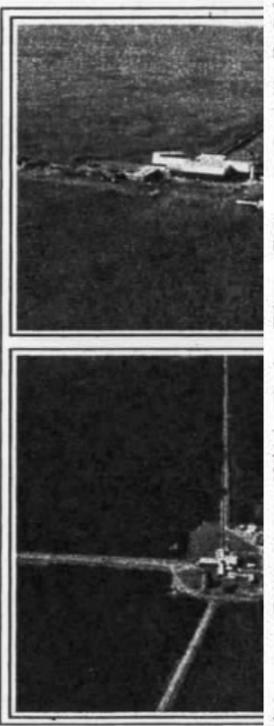
同大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(23)は「重力波だけでなく、ブラックホールも直接観測したことになる」と分かった、ためになった」と話していた。

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

ブラックホール 解明に期待

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

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



できなかった。その謎に迫る強力な手段になる。また、弱まらずに遠くまで届くので、遠い星の観測や誕生直後の宇宙の姿を知るのにも役立つと期待されている。

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

東京新聞 2016/2/12

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

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

【畠山哲郎】

毎日新聞 2016/2/13

内容紹介

物理系の科学者が中心の随筆雑誌。

「予想通りで驚いた」

——重力波初観測の報道に接して

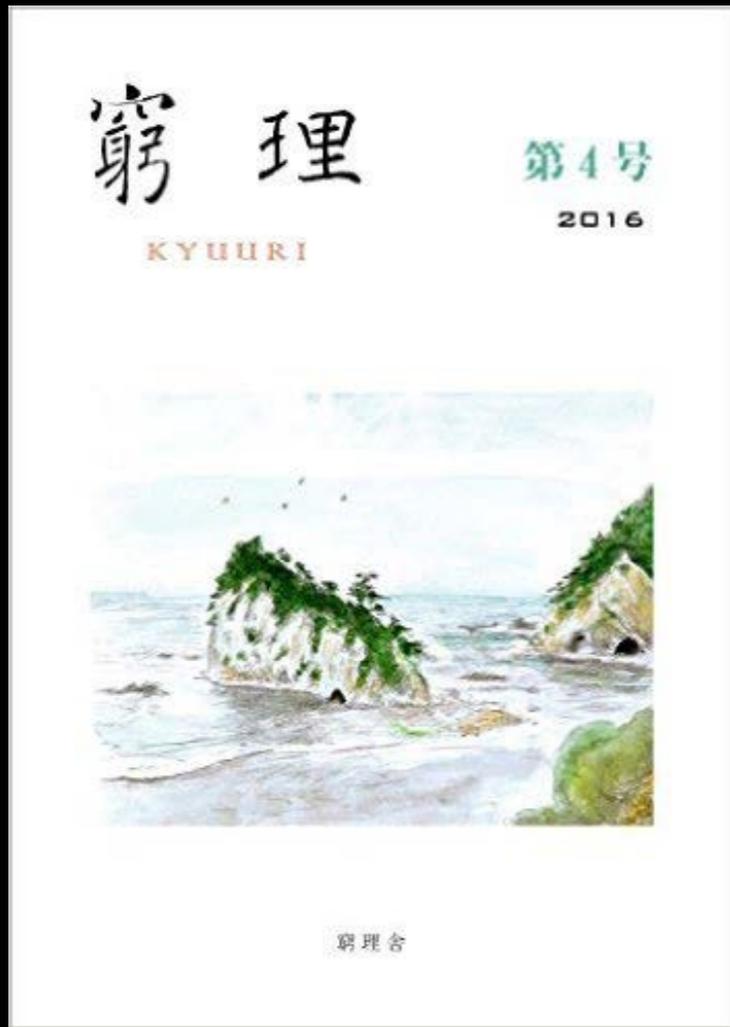


真貝 寿明

本年（二〇一六年）は、アインシュタインが一般相対性理論の本論文を発表してちょうど一〇〇年になる。その一〇〇年を祝うかのように、二月一二日深夜（米国時間一日）、アメリカのLIGO（ライゴ、注1）のグループは、ブラックスホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した、と発表した。重力波は、一般相対性理論が予言する物理現象だが、一世紀を経て、ようやく直接観測されたことになる。

私は、一般相対性理論の理論研究に関わって四半世紀になる。これまで重力波を研究の中心に据えてきたわけではないが、この瞬間を待ち望んでいた一人だ。記者発表の中継は、インターネットで研究者仲間とチャットしながら自宅で見守っていた。発表の第一声は、LIGO所長のデビット・ライツイによる「我々は重力波を検出した。やり遂げたのだ（We did it）」だった。彼のガッツポーズが、我々の喜びを倍増させた。

重力波については広く報道されたので、ここでは詳細を避けるが、少しだけ

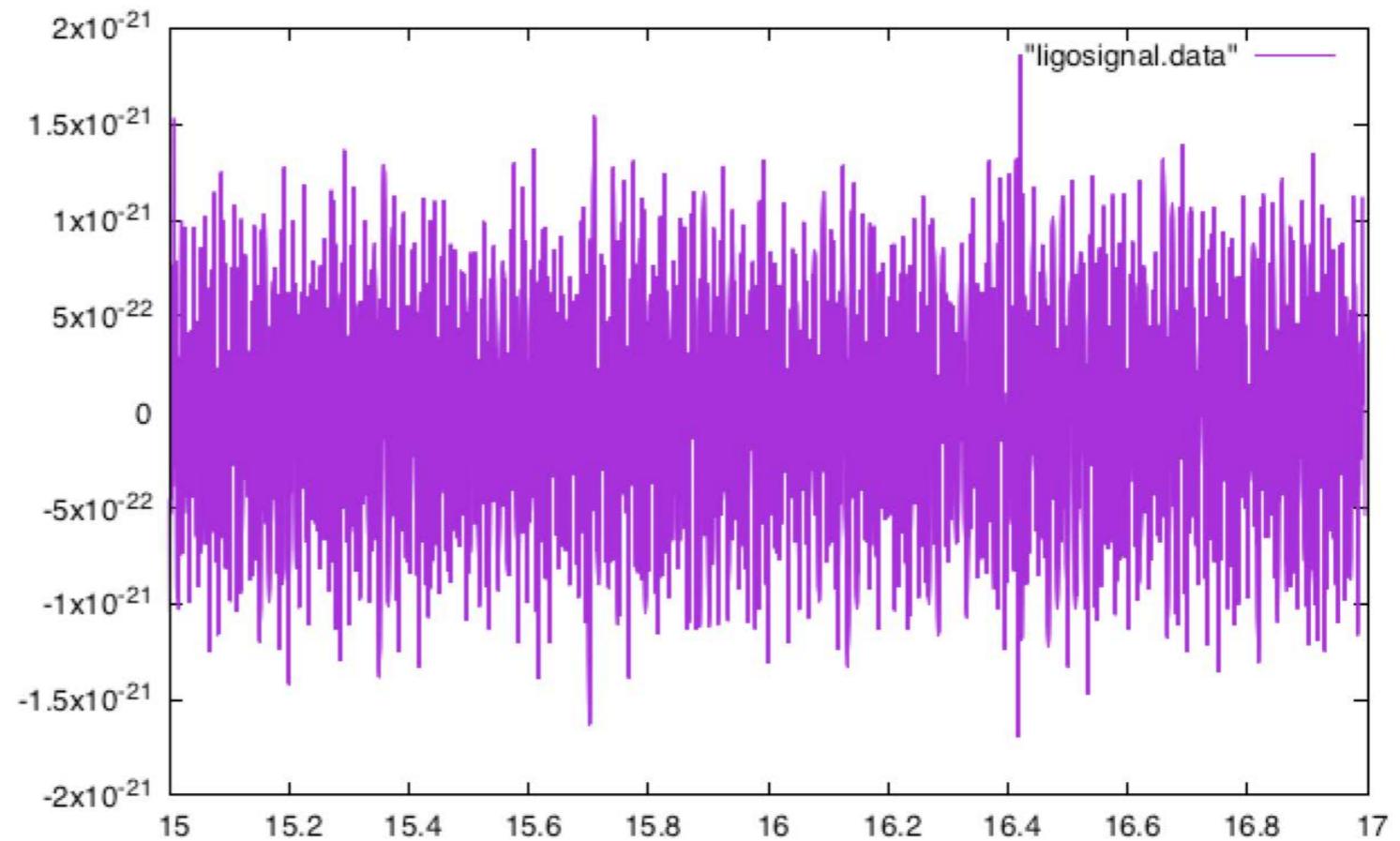


2016年7月20日発売

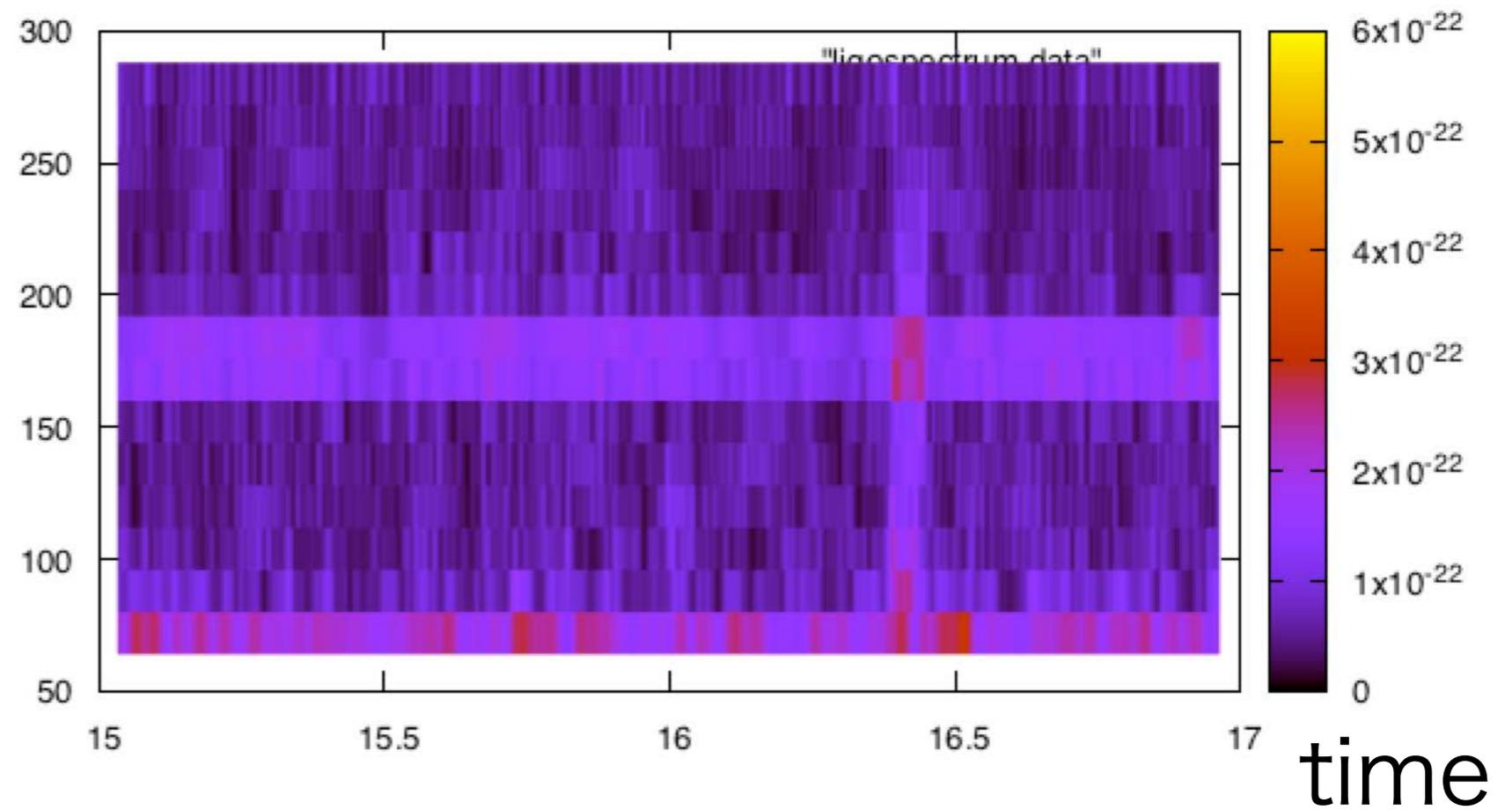
しんかい・ひさあき。
一九六六年生まれ。早稲田大学大学院理工学研究科修了。博士（理学）。ワシントン大（セントルイス）博士研究員、ペンシルバニア州立大学客員研究員、理化学研究所基礎科学特別研究員などを経て、現在、大阪工業大学情報科学部教授。専門は、一般相対性理論。最近では高次元時空の特異点形成などを研究している。著書に『図解雑学タイムマシンと時空の科学』『ブラックホール・膨張宇宙・重力波』。一般相対性理論の100年と展開「『日常の「なぜ」に答える物理学』などがある。ホームページは、<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>

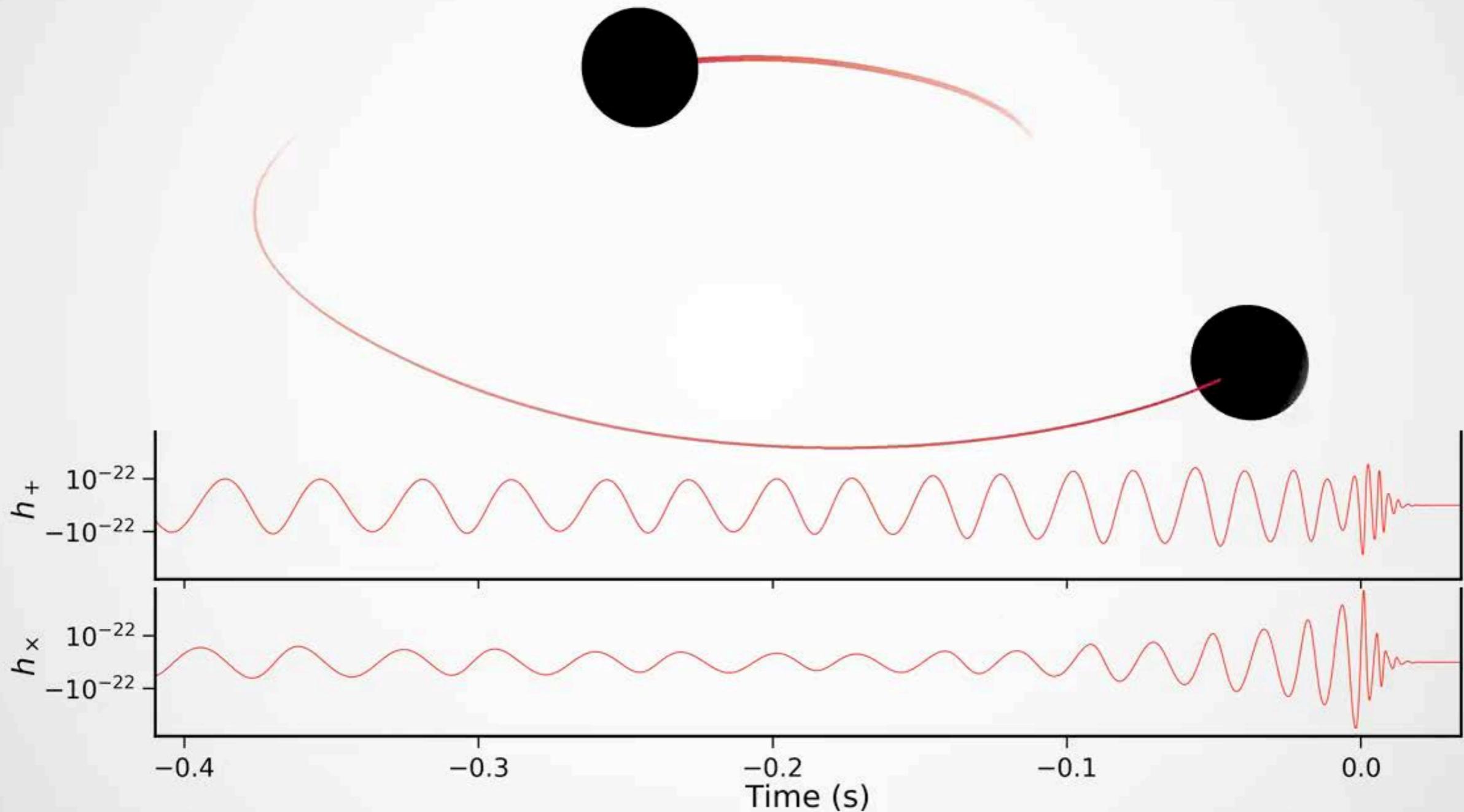
GW150914

$h(t)$



freq





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

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

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

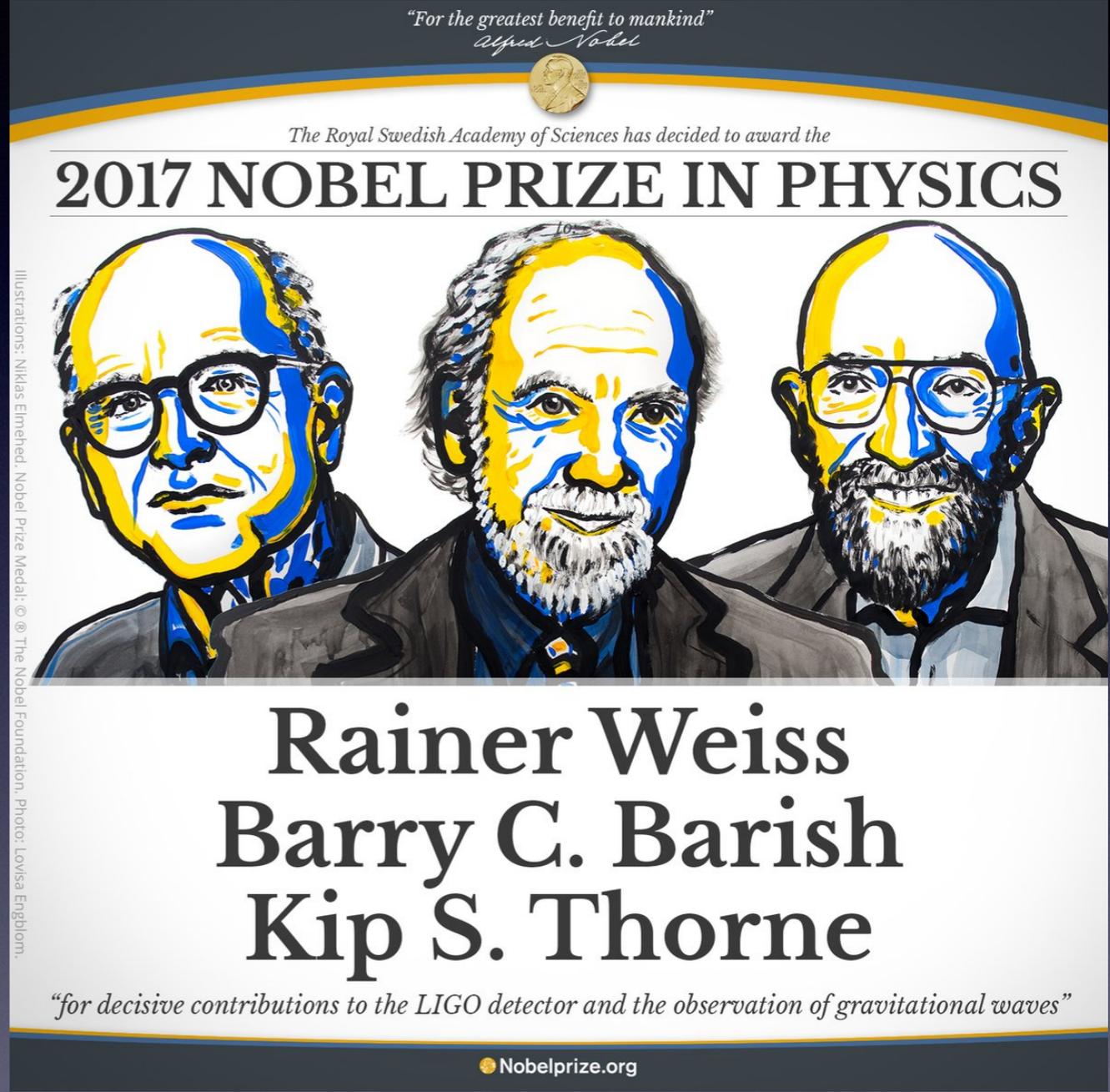
<http://ligo.org/detections/GW170104.php>

1. 重力波観測

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した,
と発表 GW150914



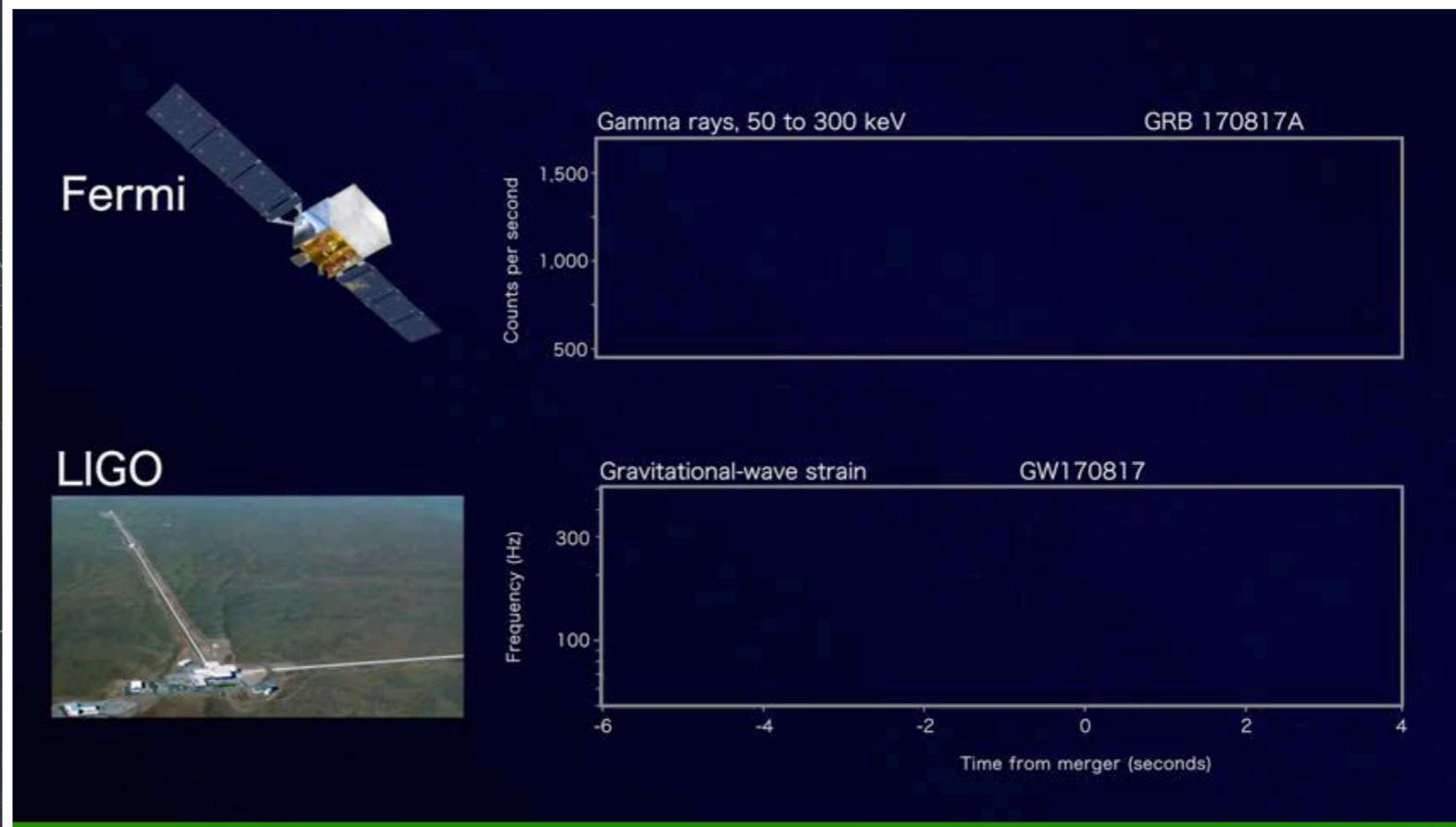
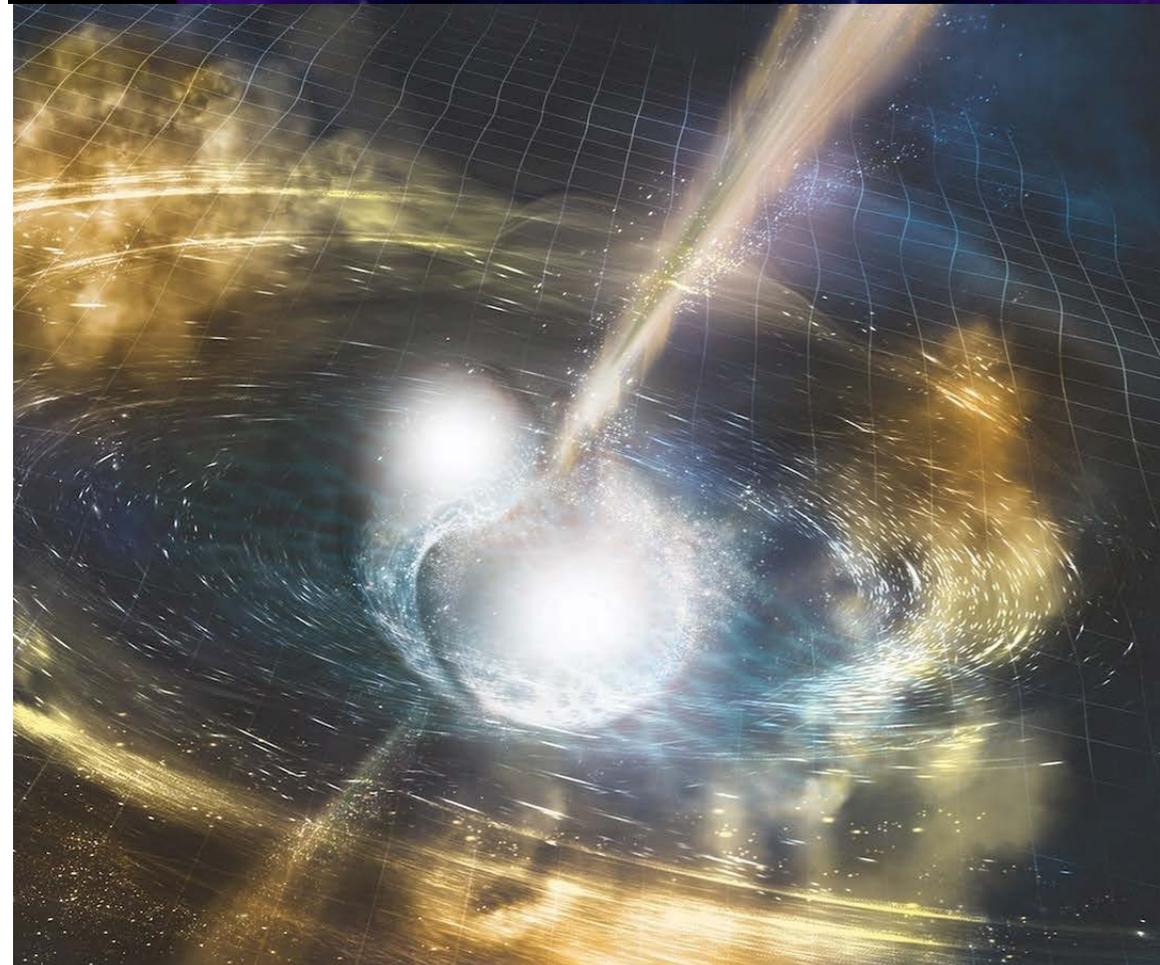
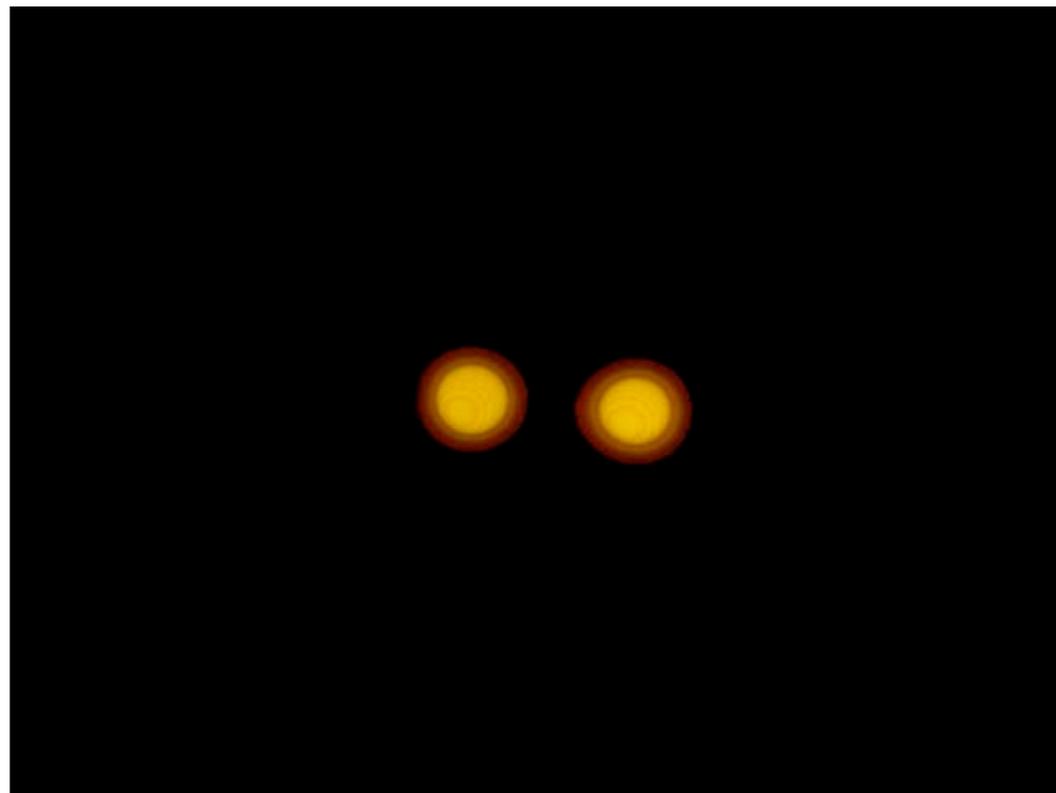
2017年10月, LIGO/Virgo
中性子星連星合体観測を発表
GW170817



2017年10月, ノーベル財団が, 重力波検出
に貢献した3名をノーベル物理学賞として顕彰

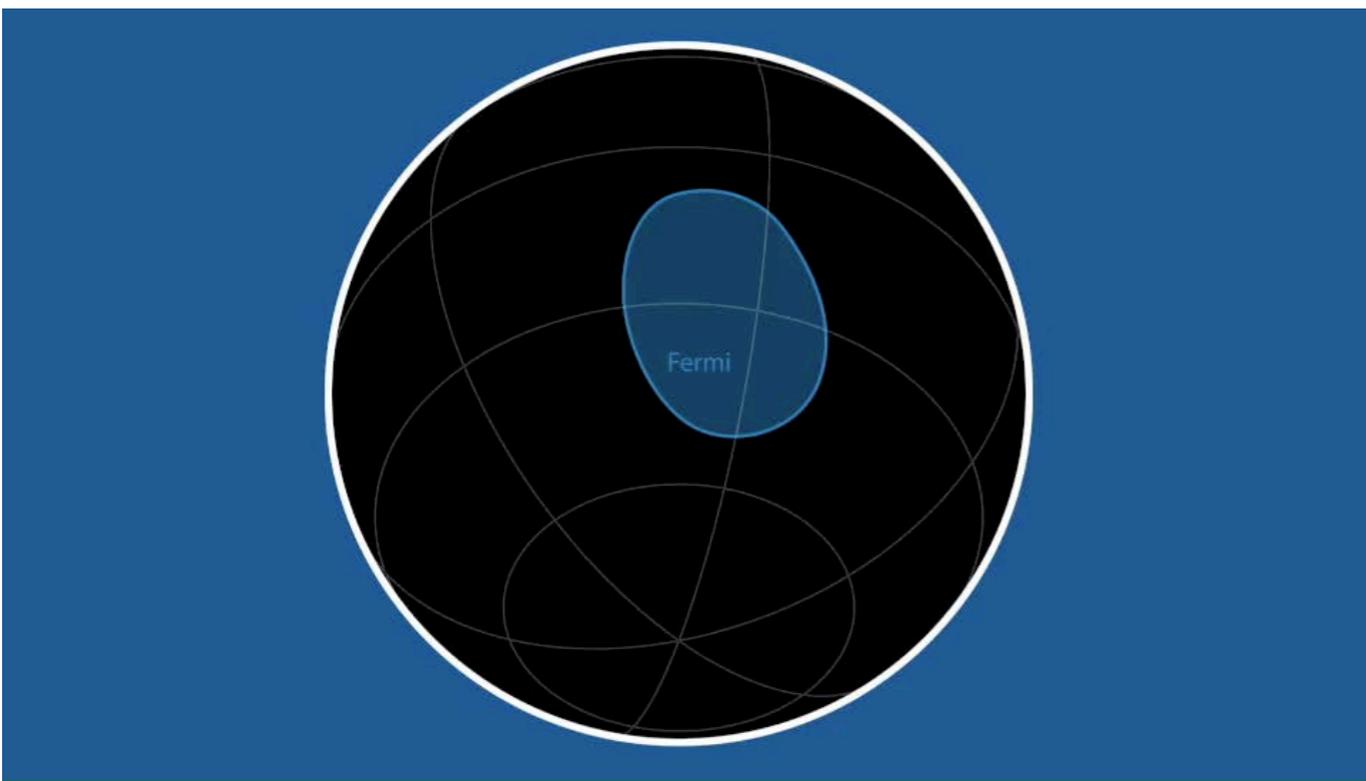
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

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) !

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

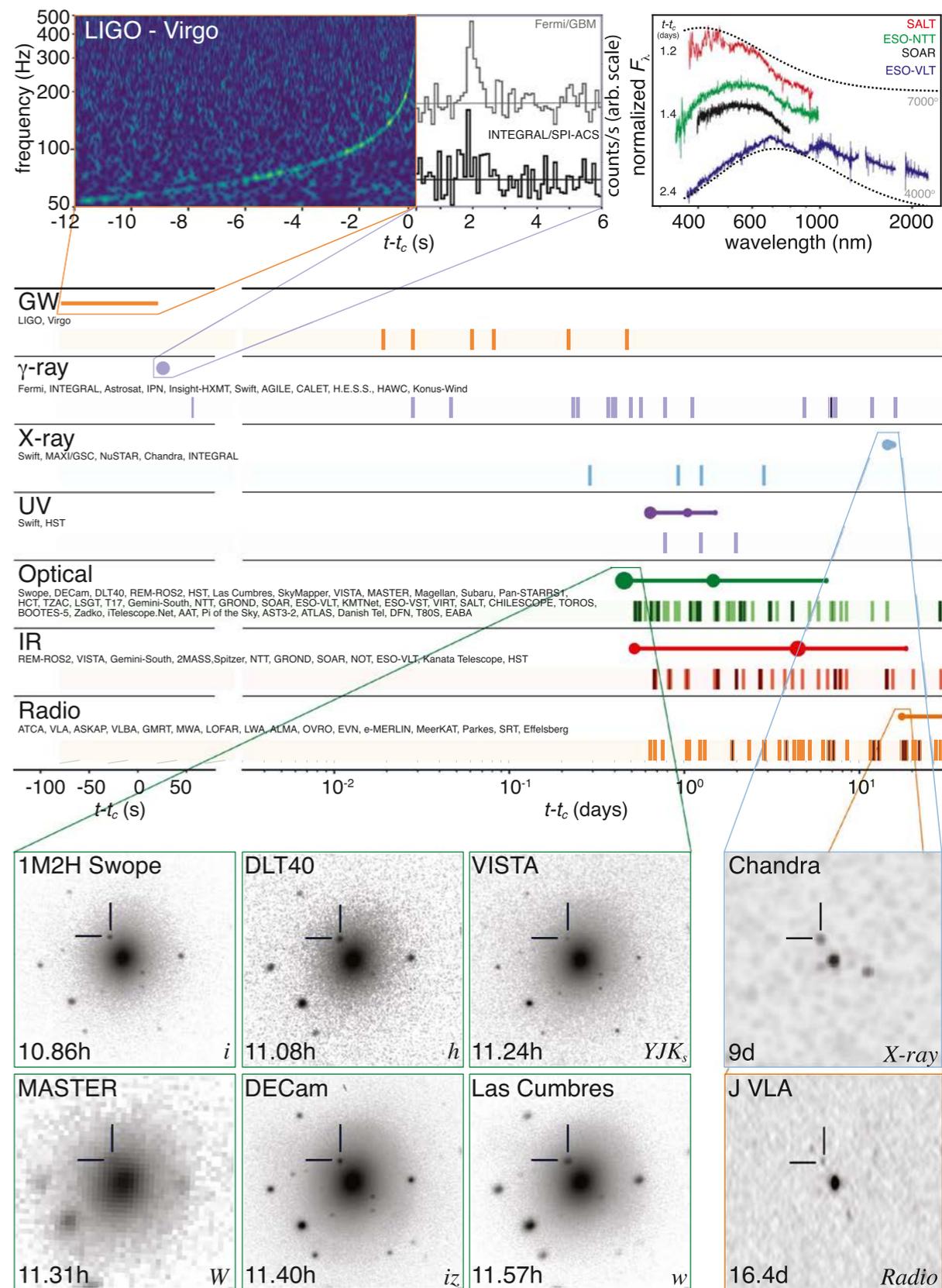


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent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



一般相対性理論は正しいか？

時空のゆがみ

水星の近日点移動が説明できた
地球重力の検証では理論に反しない

光の曲がり

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

重力波

重力波は存在し、ブラックホールのような強い重力場でも、
これまでのところ一般相対性理論に矛盾しない。

宇宙モデル

膨張宇宙を表すフリードマン時空は、たった6つのパラメータ
で、宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎを説明することができる。

コラム 1 (アインシュタインも信じなかった一般相対性理論の帰結)

アインシュタイン自身は (4.1) 式を導いて大満足だったのだが、実はこの方程式を解いて得られる時空は、アインシュタインさえも疑う突飛なものだった。

- シュヴァルツシルト解は後にブラックホールを表すことがわかる。しかし、この式に登場する特異点の存在は奇妙なものだった。アインシュタインは、この解の設定条件が簡単すぎたことを疑い、また後には特異点を回避するためのワームホール構造を提案する。
- FLRW 解は宇宙全体が膨張・収縮することを予言するが、アインシュタインは「間違いに違いない」と信じ、宇宙全体が静止しつづけていられるように、宇宙項を導入する。
- (4.1) 式から空間の歪みが波のように伝播する重力波の存在も予言されるが、等価原理を考えると重力波は局所的には存在しないと誤解される。アインシュタインも一時期そう考えて重力波の存在を否定する論文を投稿した。

ブラックホールも膨張宇宙も重力波も、いずれも一般相対性理論の予言する産物だが、アインシュタイン本人が当初拒否反応を示したことは興味深い。一般相対性理論が描く世界は、当初の想像以上に不思議で奇妙なものだったのだ。詳しくは真貝著「ブラックホール・膨張宇宙・重力波」(光文社新書, 2015) で味わっていただきたい。



ブラックホール・

膨張宇宙・重力波

一般相対性理論の100年と展開



真貝寿明

2015年は、アルベルト・アインシュタインが一般相対性理論を創り上げたから、ちょうど100年にあたる。一般相対性理論は20世紀の物理学を一変させたが、この理論が描く世界は、アインシュタイン自身の想像を超えるほど奇妙なものだった。

本書では、誕生から今日までの100年の間に、一般相対性理論がどのように理解されてきたのかを俯瞰すると同時に、ブラックホール(膨張宇宙・重力波)という、アインシュタイン自身が一度は拒否反応を示したものの、現在では研究の主流となっている3つのトピックを概観。現代物理学の知見は私たちに何をもたらすのか――最新の研究成果を交えて探る。

宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論**
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

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

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>